

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

GEOVANIL DE JESUS DIONIZIO

**INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGEN:
UMA ANÁLISE HISTORIOGRÁFICA E FILOSÓFICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO

APUCARANA

2016

GEOVANIL DE JESUS DIONIZIO

**INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGEN:
UMA ANÁLISE HISTORIOGRÁFICA E FILOSÓFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Licenciatura em Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Apucarana, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. José Bento Suart Júnior.

APUCARANA
2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Bento Suart

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana
Orientador

Prof. Me. Enio de Lorena Stanzani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana
Membro

Profa. Me. Rafael Block Samulewski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Apucarana
Membro

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Licenciatura em Química”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me concedeu a graça da concretização do presente trabalho e inúmeras conquistas ao longo de minha vida, à todos os santos, santas e anjos do céu por sua intercessão em todos os momentos dessa longa trajetória.

Agradeço a minha família, em especial minha mãe e meu pai, por sempre me incentivarem em todos os desafios, por nunca desistirem nos momentos difíceis e pelo seu amor incondicional.

Ao professor Dr. José Bento Suart Júnior por sua intensa dedicação na orientação desse trabalho, por seu conhecimento inesgotável e por sua paciência em todas as revisões do presente trabalho.

Aos professores Enio de Lorena Stanzani e Rafael Block Samulewski por aceitarem compor a banca de avaliação do presente trabalho.

Ao professor Sandro Aurélio de Souza Venter e a professora Graciana Freitas Palioto, por terem ministrado, respectivamente, as disciplinas de Trabalho de Conclusão de Curso 2 e Trabalho de Conclusão de Curso 1.

A todos que contribuíram com recomendações de textos e livros, com sugestões para a melhora do presente trabalho e com palavras de apoio e incentivo.

Agradeço à todos os professores que lecionaram aulas ao decorrer dessa jornada, aos professores e alunos que tive contato durante a realização das disciplinas de estágio supervisionado, que me proporcionaram inúmeros aprendizados tanto na formação acadêmica, quanto na formação ética.

A todos os demais funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana, pelo seu trabalho incansável e dedicação.

Agradeço à todos os amigos, colegas, conhecidos, que me ajudaram ao longo da vida, em especial nesses 4 anos.

“Toda grande e profunda dificuldade carrega em si sua própria solução.”

(Niels Bohr)

RESUMO

DIONIZIO, Geovanil J. Interpretação de Copenhagen: Uma Análise Historiográfica e Filosófica. 2016. p. 120. Trabalho de Conclusão de Curso- Curso Superior de Licenciatura em Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2016.

O ensino de Mecânica Quântica é um grande desafio para os professores tanto do Ensino Médio, quanto do Ensino Superior, devido aos seus conceitos abstratos, repletos de anomalias e de difícil compreensão por parte dos alunos. O ensino é dificultado pela escassez de materiais de apoio disponíveis. A área de pesquisa em ensino de química quântica possui ainda pouquíssimos artigos publicados. Assim, o objetivo desse trabalho é compreender as contribuições de Niels Bohr e dos demais cientistas para o desenvolvimento da Interpretação de Copenhagen, o papel dessa interpretação na consolidação da mecânica quântica e as questões filosóficas e conceituais a respeito da mecânica quântica e em relação aos valores atribuídos à atividade científica, por meio da elaboração de um texto historiográfico. A metodologia de pesquisa utilizada é a historiografia, assumindo uma interpretação baseada nas uniões das visões anacrônicas e diacrônicas de história da ciência e das abordagens internalistas e externalistas; fazendo uso de fontes secundárias. Mediante a elaboração desse texto historiográfico fica evidenciado que Niels Bohr contribuiu não apenas matematicamente para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, mas também filosoficamente ao adotar uma visão positivista, além de contribuir para a formação de vários cientistas da época. A eficácia do presente trabalho como um texto de apoio, necessita que o mesmo seja aplicado em salas de aula tanto do Ensino Médio, quanto do Ensino Superior, para que possa ser analisado por professores e por alunos. Após, essa análise seria preciso ainda a elaboração de outros textos que abordem de maneira detalhada as demais interpretações como complemento do primeiro texto. Tal aspecto mostra-se como uma das possibilidades futuras de trabalho no interior desta temática.

Palavras-chave: Mecânica Quântica. Interpretação de Copenhagen. Niels Bohr. Historiografia. História da Ciência.

ABSTRACT

DIONIZIO, Geovanil J. Copenhagen interpretation: a historical and philosophical analysis. 2016. p. 120. Trabalho de Conclusão de Curso- Curso Superior de Licenciatura em Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2016.

The teaching of quantum mechanics theory is a challenge for high school and higher education teachers due to their abstract concepts, philosophical anomalies and student's difficulties to understand. Another problem is the lack of available support materials. The research area of quantum chemistry teaching also has very few published articles too. The objective of this work is understand the contributions of Niels Bohr and other scientists to the development of the Copenhagen Interpretation, the role of this interpretation in the consolidation of quantum mechanics and the philosophical and conceptual issues about quantum mechanics in relation to the values assigned to the scientific activity, by means of the elaboration of a historiographic text. This research is methodological structured by historiography, taking an historical interpretation of facts based on the union of anachronistic and diachronic views of the history of science with both internalist and externalist approaches, making use of secondary sources. Through the development of this historiographical text it is evident that Niels Bohr contributed not only mathematically for the development of quantum mechanics, but also philosophically to adopt a positivistic view, and contribute to the formation of several scientists of the time. The effectiveness of this work as a supporting text, requires that it be applied in classrooms both the high school, as higher education, so it can be analyzed by teachers and students. After this analysis we would still need to draw up other texts that address in detail the other interpretations as a complement of the first text. This aspect is shown as one of the future work possibilities within this theme.

Keywords: Quantum Mechanics. Copenhagen interpretation. Niels Bohr. Historiography. History of Science.

Lista de Siglas

BKS Bohr-Kramers-Slater

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

CTS Ciência, Tecnologia e Sociedade

EPR Einstein-Podolsky-Rosen

HFC História e Filosofia da Ciência

SUMÁRIO

Introdução	9
1 Contexto da Pesquisa	11
2 Questão de Pesquisa.....	21
3 A Importância da História e Filosofia da Ciência no Ensino de Química	22
4 Metodologia.....	30
6 Histórico dos antecedentes da Interpretação de Copenhagen	36
7 Interpretação de Copenhagen	49
7.1 Princípio da Incerteza	49
7.2 Princípio da Complementaridade	54
7.3 Postulados de Von Neumann	58
8 Críticas a Interpretação de Copenhagen.....	63
8.1 Debate Bohr-Einstein.....	63
8.2 Interpretação Dualista Realista.....	70
8.3 Interpretação Ondulatória Realista	74
8.4 Interpretação Corpuscular Realista.....	78
8.5 Debate Heisenberg-Dirac	81
9 Bohr e a Interpretação Ortodoxa da Mecânica Quântica	84
Considerações finais.....	87
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE.....	105

Introdução

A mecânica quântica é uma teoria de extrema importância para o mundo científico, uma vez que segundo Pires (2011), sem ela não seríamos capazes de explicar a existência dos elementos radioativos, a cor das estrelas, o comportamento dos transistores, o funcionamento dos lasers e muitos outros fenômenos.

Para além de suas contribuições teóricas, a mecânica quântica é uma importante ferramenta de ensino científico, visto que, o estudo histórico-filosófico sobre seu desenvolvimento possibilita ao estudante compreender o processo de construção do conhecimento científico, possibilitando que o mesmo seja capaz de romper com a visão distorcida de ciência neutra e empirista, formada exclusivamente por “gênios”, que não sofreram nenhuma influência política, religiosa, econômica ou social no desenvolvimento de suas obras.

O estudo histórico-filosófico da construção da teoria quântica mostra ainda que a mesma foi desenvolvida a partir de inúmeros debates, ocasionados por diferentes visões filosóficas de mundo, algumas dessas devido à influência religiosa. A filosofia da ciência permite assim que o aluno faça uma reflexão sobre a ciência e crie um novo olhar sobre a mecânica quântica e suas diversas interpretações, permitindo que o aluno possa visualizar sua crença pessoal em uma das diferentes interpretações sobre as quais esta se assenta.

Entretanto, o ensino de mecânica quântica é dificultado pela escassez de materiais de qualidade, limitando-se muitas vezes ao livro didático, que é repleto de erros históricos e visões distorcidas de ciência. Outros fatores que contribuem para uma compreensão errônea da mecânica quântica são a má formação dos professores brasileiros e o seu caráter abstrato, repleto de anomalias filosóficas.

Dentro desse contexto torna-se necessário auxiliar o ensino e aprendizagem de mecânica quântica por meio da produção de materiais de apoio tanto para professores quanto para os alunos assim como para o público em geral. Tais materiais devem focar uma análise filosófica sobre as inúmeras anomalias das interpretações da mecânica quântica, em especial a interpretação de Copenhague, além de uma investigação histórica sobre os fatores que foram determinantes para o surgimento da Interpretação de Copenhague, o papel de Niels Bohr em sua criação, a influência de outros cientistas adeptos ou contrários a essa interpretação assim como os fatores conceituais, filosóficos e políticos que levaram a sua difusão. Tais aspectos constituem os objetos de estudo da proposta de investigação que aqui se coloca por meio deste

trabalho que visa à produção de um estudo historiográfico e filosófico da Interpretação de Copenhagen.

O presente trabalho será iniciado com uma revisão bibliográfica, que nos possibilitará compreender o contexto das pesquisas em ensino de mecânica quântica, pois como Kragh (2001) destaca, a consulta bibliográfica constitui uma importante função para trabalhos em história da ciência. Após a revisão, será apresentada a questão problema que delimitará a construção desse trabalho.

No capítulo 4 será explicada a importância em seu utilizar história e filosofia no ensino de ciência, uma vez que, ainda existem vários professores que contestam a importância de se utilizar História e Filosofia da Ciência (HFC) na elaboração de suas aulas. No capítulo seguinte, a metodologia de pesquisa será explicada em detalhes, destacando assim os passos necessários para a produção de um texto historiográfico.

No capítulo 6 o texto historiográfico será iniciado por um breve resumo histórico sobre os antecessores da Interpretação de Copenhagen, que foram essenciais para a criação da mecânica quântica. Serão destacados o surgimento do quanta de energia, as pesquisas sobre emissão atômica e os distintos modelos atômicos elaborados na época. No capítulo seguinte será apresentado o surgimento da Interpretação de Copenhagen e a sua base conceitual, destacando-se o Princípio de Incerteza de Werner Heisenberg, o Princípio de Complementaridade de Niels Bohr e os Postulados de von Neumann.

No capítulo 8 serão apresentadas as principais críticas à Interpretação de Copenhagen, incluindo os debates e as Interpretações alternativas. No capítulo posterior será destacada a contribuição de Niels Bohr para a ciência.

1 Contexto da Pesquisa

A seguinte revisão bibliográfica, aqui apresentada, envolveu um levantamento dos principais artigos publicados entre o período de 2000-2015, disponibilizados em versão online por revistas brasileiras classificadas pela CAPES no sistema WEBQualis com índices de avaliação A1, A2, B1 ou B2 na área de ENSINO.

A busca por artigos foi realizada diretamente nos sites de cada uma das revistas. As seguintes palavras-chaves foram utilizadas: “Mecânica Quântica”, “átomo”, “orbital”, “Bohr”, “Heisenberg”, “Schrödinger”, “Pauli”, “Dirac”, “Planck” e “De Broglie”. Quando os sites não apresentavam sistemas de busca, foi utilizado o indexador Scielo. Em casos de ausência da revista no mesmo, pesquisou-se em cada exemplar da revista o conteúdo presente.

No total foram pesquisadas 133 revistas, sendo que destas, apenas 16 revistas apresentavam pelo menos 1 artigo que se enquadrava na temática mecânica quântica, sendo encontrados ao todo 139 artigos relacionados a mecânica quântica, os quais se encontram relacionados no apêndice A. A Tabela 1, a seguir, mostra detalhadamente a relação entre a classificação e o número total de revistas pesquisadas, o número de revistas que possuem artigos sobre mecânica quântica e o número de artigos sobre mecânica quântica.

Tabela 1- Correlação entre classificação WEBQualis com número de revistas pesquisadas, número de revistas com artigos sobre mecânica quântica e número de artigos sobre mecânica quântica.

Qualis	Nº de revistas pesquisadas	Nº de revistas que possuem artigos sobre Mecânica Quântica	Nº de artigos sobre Mecânica Quântica
A1	7	2	72
A2	11	2	6
B1	57	9	58
B2	58	3	3

A Tabela mostra que a maioria dos artigos publicados sobre mecânica quântica se encontra em revistas classificadas como A1 ou B1, tendo raríssimos exemplares publicados em revistas A2 ou B2.

O Gráfico 1 a seguir apresenta as porcentagens correspondentes ao número de artigos encontrados em cada classificação WEBQualis, ressaltando a predominância de artigos publicados nas revistas classificadas como A1 e B1, que juntas somam 94% dos artigos publicados.

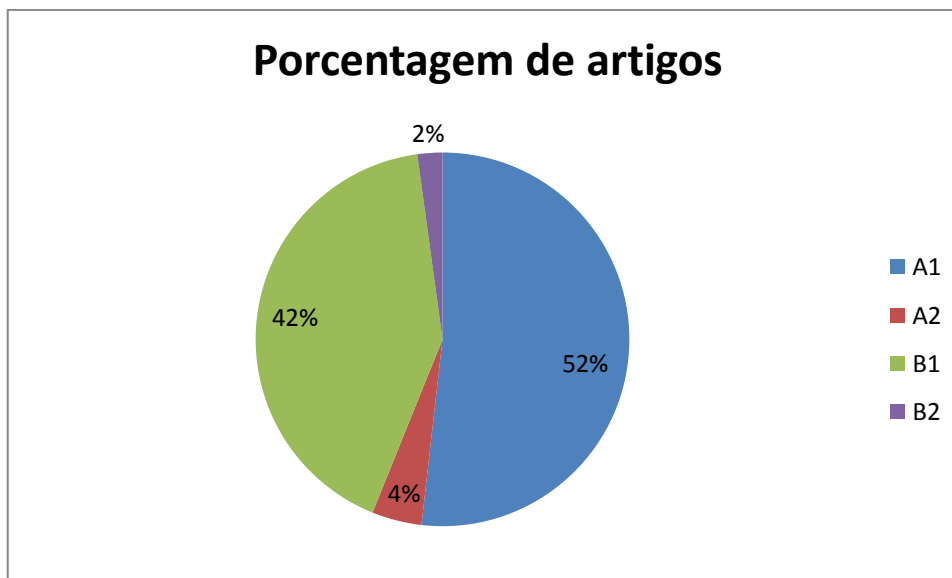


Gráfico 1- Porcentagem de artigos publicados em cada classificação WEBQualis.

Em seguida, desses 139 artigos, foram selecionados apenas os artigos com enfoque na área de química, contabilizando 26 artigos. O Quadro 1 a seguir apresentará detalhadamente esses vinte e seis artigos, junto com suas respectivas revistas, classificação WEBQualis, ano de publicação e autoria.

O Quadro 1 indica que uma minoria dos artigos sobre mecânica quântica aborda qualquer contexto referente à química. A maioria desses artigos com relação à química está disponibilizada na revista Química Nova na Escola, como mostra o quadro a seguir.

Dos 26 artigos citados, 4 apresentam foco nos livros didáticos de química. Os artigos presentes nessa categoria destacam a importância dos livros de texto no ensino de Química e analisam possíveis erros presentes nos mesmos. Por exemplo, Rozentalski e Porto (2015) caracterizaram, por meio da semiótica peirceana, como os autores de 26 livros de Química Geral para o Ensino Superior do século XX descrevem e empregam imagens de orbitais.

QUALIS	Nome da Revista	Título do Artigo	Autoria	Ano de publicação
A1	Ciência & Educação	El modelo semi cuántico de Bohr em los libros de texto.	Jorge Eliécer Moreno Ramírez, Rómulo Gallego Badillo II, Royman Pérez Miranda	2010
A1	Ciência & Educação	Historia y filosofia de las ciencias em la educación polimodal: propuesta para su incorporación al aula.	Verónica Guridi; Irene Arriasecq	2004
A1	Ciência & Educação	Oficina temática: Uma proposta metodológica para o Ensino do modelo atômico de Bohr.	Giovanna Stefano Silva, et al.	2014
A1	Revista Brasileira de Ensino de Física	Os 100 anos do átomo de Bohr.	F.A.G Parente, A.C.F dos Santos, A.C. Tort	2013
A1	Revista Brasileira de Ensino de Física	Quando e Como o Homem Começou a “Ver” os Átomos.	Caio Mário Castro de Castilho	2003
A2	Investigação em Ensino de Ciências	Imagens de orbitais em livros didáticos de química geral no século XX: uma análise semiótica	Evandro Fortes Rozentski; Paulo Alves Porto	2015
B1	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Pode-se progredir com base em fundamentos inconsistentes? (o caso do átomo de Bohr).	Jenner Barreto Bastos Filho	2003
B1	Experiências em Ensino de Ciência	A elaboração conceitual em realidade escolar na noção de vazio no momento corpuscular da matéria.	Vander Edier Ebling Samrsla; Marcelo Leandro Eichler; José Claudio Del Pino.	2007
B1	Experiências em Ensino de Ciência	Uma proposta didática para elaboração do pensamento químico sobre elemento químico, átomos, moléculas e substâncias.	Edson José Wartha; et. al.	2010
B1	Experiências em Ensino de Ciência	Principios de mecânica cuántica em La resolución de problemas de estructuras atómicas en Estudiantes de química.	Concesa Caballero Sahelices; Jesús A. Menezes Villágra	2013
B1	Química Nova na Escola	A representação pictórica de entidades cuánticas da Química.	Osvaldo Pessoa Júnior	2007
B1	Química Nova na Escola	O conceito de Hibridização.	Joana Maria Ramos, et al.	2008
B1	Química Nova na Escola	Constante de Planck: Uma nova visão para o ensino médio.	Sílio Lima de Moura, et. al.	2011
B1	Química Nova na Escola	Modelos Teóricos para Compreensão da Estrutura da Matéria.	Wagner B. de Almeida; Hélio F. dos Santos	2011
B1	Química Nova na Escola	Fluorescência e Estrutura Atômica: Experimento simples para abordar o tema.	Ana Luisa Petillo Nery; Carmen Fernandez	2004
B1	Química Nova na Escola	História da Ciência no Estudo de Modelos Atômicos em Livros Didáticos de Química e Concepções de Ciência.	Ligia M. Martinho Pereira Chaves; Wildson Luiz Pereira dos Santos; Maria Helena da Silva Carneiro	2014
B1	Química Nova na Escola	A radioatividade e a História do tempo Presente.	Fábio Merçon; Samantha Viz Quadrat	2004
B1	Química Nova na Escola	Duzentos anos da teoria atômica de Dalton.	Carlos Alberto L. Filgueiras	2004
B1	Química Nova na Escola	Como a química Funciona?	Murilo Cruz Leal	2001
B1	Química Nova na Escola	Dificuldade de Ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química.	Marlene Rios Melo; Edmilson Gomes de Lima Neto	2013
B1	Química Nova na Escola	Carga Nuclear Efetiva e sua consequência para a compreensão da estrutura eletrônica dos átomos.	Hélio Anderson Duarte	2003
B1	Química Nova na Escola	Estrutura Atômica e Formação dos Íons: Uma análise das Ideias dos alunos do 3º ano do Ensino Médio.	Angella da Cruz Guerra França; Maria Eunice Ribeiro Marcondes; Miriam Possar do Carmo.	2009
B1	ScientiaeStudia	Entre mecânica cuántica y estructuras químicas: a qué refiere la química cuántica?	Olimpia Lombardi; Juan Camilo Martínez González	2012
B1	ScientiaeStudia	La filosofia trascendental y La interpretación de Bohr de La teoria cuántica.	Hernán Pringe	2012
B2	Ciências & Cognição	Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomos.	Henrique José Polato Gomes; Odisséa Boaventura de Oliveira	2007

Quadro 1- Artigos de Mecânica Quântica sobre Química.

Cinco artigos apresentam análises sobre a aprendizagem por parte dos alunos. Esta categoria engloba os artigos que apresentam aplicações diretas em sala de aula, por meio de gravações, questionários e outras técnicas de pesquisa.

Melo e Lima Neto (2013), por exemplo, destacam a ausência no ensino de química de discussões sobre como os modelos científicos são construídos e a dificuldade dos alunos em compreender modelos científicos não palpáveis. Os autores ministraram a disciplina de Estágio Supervisionado 2, na qual dois licenciandos propuseram o ensino de modelos atômicos para alunos do Ensino Médio, induzindo-os a levantarem hipóteses, por meio de questionários sobre as definições de átomos e partículas; sobre cores de fogos de artifícios e por fim utilizando o teste de chama. Os autores comprovam a dificuldade existente tanto por parte dos alunos, quanto por parte dos licenciandos em trabalharem com um ensino-aprendizagem que utilize o estudo da histórica¹.

Oito dos artigos selecionados apresentam propostas de experimentos ou métodos educacionais alternativos para o ensino de mecânica quântica. Como exemplo dessa categoria, Guridi e Arriasecq (2004) apresentam vários textos com enfoque na inclusão da história da ciência no ensino de física e química. Por fim os autores defendem um método de ensino baseado na leitura de textos sobre modelos atômicos e debates em grupos.

Dos 26 artigos selecionados, 4 apresentam enfoque histórico: Parente, Sort e Santos (2013) apresentam um artigo especial sobre os 100 anos do modelo atômico de Bohr, destacando os predecessores de Bohr suas contribuições, suas falhas, o próprio modelo de Bohr, sua elaboração e as críticas sofridas. Filgueiras (2004) destaca os duzentos anos da teoria atômica de Dalton, destacando o modelo atômico de Dalton e seus predecessores, o conflito autoral com Higgins. Além disso, destaca brevemente a história pessoal de Dalton e suas contribuições para o desenvolvimento da química e da ciência em geral.

Castilho (2003) prefere destacar os 50 anos do primeiro artigo de Erwin W. Müller sobre o microscópio Iônico de Campo, que permitiu pela primeira vez “ver” átomos. Para isso, primeiramente apresenta uma breve revisão histórica destacando alguns cientistas, depois o mesmo compara o funcionamento do microscópio iônico de campo com fenômenos macroscópicos.

¹ Caracterizado pela insatisfação do professor em relação à situação atual e à provocação contínua no campo científico, pedagógico ou dialógico para uma aproximação a um ideal. Professor sinaliza para os alunos que algo está faltando para a maestria e estes se sentem desafiados (MELO; LIMA NETO, 2013, p.118).

Merçon e Quadrat (2004) apresentam uma linha do tempo entre a descoberta do raio X e os acidentes nucleares, destacando o projeto Manhattan e as participações de Enrico Fermi e J. Robert Oppenheimer nos testes predecessores das bombas atômicas.

Dos 26 artigos selecionados, 4 deles apresentam visões sobre a filosofia da química: Pringe (2012) discute o postulado quântico de Bohr, analisando suas consequências, através de uma visão transcendental. O autor procura relacionar o postulado quântico com o ponto de vista da complementaridade, analisando o problema da objetividade e da experimentação na química quântica. Lombardi e Gonzáles (2012) investigam a questão da ontologia da química quântica, utilizando duas abordagens distintas sobre o conceito de ligação química, sendo denominadas, como ligação de valência e teoria do orbital molecular.

Bastos Filho (2004) procura debater sobre a presença de Lógica e Dialética no contexto da atividade científica e discutir como ideias e teorias incompatíveis podem ser combinadas no contexto de um procedimento fértil. Primeiramente enfoca Lakatos, Popper e inúmeros teóricos da filosofia da ciência e por fim apresenta o modelo atômico de Bohr e sua evolução apresentando suas incompatibilidades.

Leal (2001) critica a falta de discussões sobre as diferenças de teoria, regra e modelo. O autor, que define esses termos utilizando as apresentações de teorias, leis e modelos presentes em livros didáticos de química, concluiu que lei é uma generalização, uma afirmação válida para qualquer caso que se enquadre em sua estrutura; teorias são conjecturas racionais, elaboradas para descrever e explicar a estrutura e o comportamento dos materiais e substâncias, além de apresentar possíveis questões para uso dos professores em sala de aula.

Um dos artigos selecionados apresenta apenas conceitos: Ramos et al.(2008) apresentam o conceito de hibridização a partir da evolução da distribuição eletrônica, visto que os mesmo estariam interligados.

O Gráfico 2 a seguir apresenta a porcentagem de artigos publicados por área, podemos concluir um predomínio na área de Propostas educacionais.

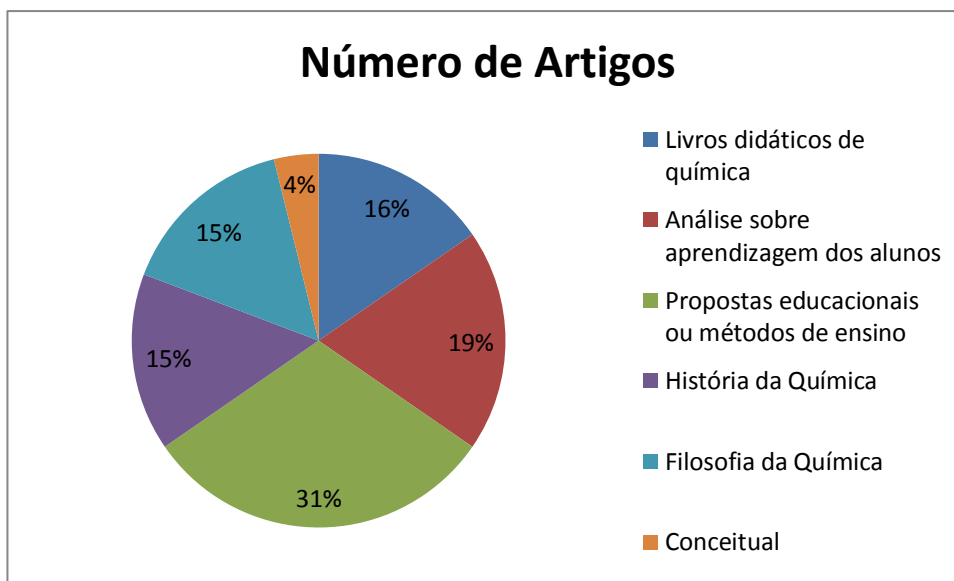


Gráfico 2- Porcentagem de artigos em cada área de pesquisa.

Por meio do levantamento bibliográfico pode-se concluir que existem pouquíssimos artigos a respeito de mecânica quântica na área de ensino de química que foram publicados em revistas brasileiras, e desses artigos apenas oito apresentam um enfoque histórico ou filosófico. Sendo claramente necessário um aumento na produção de trabalhos, que relacionem o desenvolvimento histórico e filosófico por trás da química quântica.

A Importância de produzir textos sobre mecânica quântica é ressaltada por Balsas e Videira (2013) ao afirmarem que o ponto de vista sustentado pela maioria dos físicos da atualidade na maioria das questões básicas relacionadas à mecânica quântica foi essencialmente criado por Niels Bohr e Werner Heisenberg no V congresso de Solvay em outubro de 1927, conhecido como Interpretação de Copenhague, a mesma composta de vários elementos-chave como, saltos quânticos, impossibilidade de causalidade espaço-tempo, o indeterminismo, a complementaridade entre a partícula e onda.

O estudo sobre a Interpretação de Copenhague nos possibilita compreender os vários elementos-chaves por trás da mecânica quântica, além de nos aproximar da ciência da atualidade.

Balsas e Videira (2013) apresentam vários nomes de cientistas adeptos da Interpretação de Copenhague de Bohr, nomes como Max Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Hendrik Kramers, Felix Bloch, Hendrik Casimir, Charles Darwin, Max Delbrück, Paul Dirac, Ralph Fowler, Oskar Klein, Nevill Mott, Rudolf Peierls, León Rosenfeld, Edward Teller, Viktor Weisskopf, Carl von Weizsäcker, George Gamow, Peter Kapitza, Lev Landau, Robert Oppenheimer, Richard Tolman e Yoshio Nishima. Os autores

citam ainda os nomes de Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, David Bohm, Louis De Broglie, Max Planck, Erwin Schrödinger, Alfred Landé, Hendrik Lorentz, Max von Laue, Murray Gell-Mann, Hugh Everett, Eugene Wigner e John Bell como os principais opositores da Interpretação de Copenhagen. Evidenciando assim, que a Interpretação de Copenhagen envolveu diretamente ou indiretamente toda a comunidade científica da época.

Bezerra (2013) cita que o trabalho de Niels Bohr é um importante tema de estudo da filosofia da ciência, ao destacar a pesquisa de Popper sobre o reducionismo, o qual teria afirmado que a descoberta do háfnio, através da previsão de Bohr, seria o momento em que a química foi reduzida à teoria atômica. Já Imre Lakatos utiliza-se das teorias e interpretações de Niels Bohr como um exemplo de programa de pesquisa.

O estudo conceitual, histórico e filosófico por trás da Interpretação de Copenhagen nos possibilita definir alguns fatores que levaram a adesão a esta interpretação, de vários cientistas de renome, assim como os principais problemas filosóficos que resultaram em críticas por parte de vários pesquisadores de renome. Além de compreender o papel de Niels Bohr na construção social e filosófica da Interpretação de Copenhagen.

Para Bezerra (2013) é de extrema importância o estudo da mecânica quântica antiga, visto que muitos dos conceitos da nova mecânica quântica surgiram na antiga, como o princípio da complementaridade de Bohr. Entretanto, a maioria dos alunos não compreende os principais aspectos do formalismo da mecânica quântica (ALMEIDA; SANTOS, 2001), impossibilitando que sejam capazes de compreender a ciência da atualidade. A dificuldade de compreensão dos alunos está relacionada à negligência dos cursos em esclarecer corretamente os conceitos quânticos, além da falta de consenso sobre qual base filosófica ser utilizada (PAULO; MOREIRA, 2004).

Uma das principais críticas à mecânica quântica é a sua falta de caracterização ontológica, gerando várias perplexidades filosóficas, visto que a própria Interpretação de Copenhagen via a mecânica quântica como um dispositivo matemático que nos permite calcular probabilidades, nada tendo a dizer sobre a ontologia subjacente à realidade que explora. Arenhart e Krause (2012) citam como exemplos de perplexidades filosóficas o gato de Schrödinger, a dualidade onda-partícula, a não-localidade, indistinguibilidade das entidades básicas, entre outros. Essas perplexidades são responsáveis pela falta de consenso sobre que base filosófica deve ser utilizada no ensino.

Segundo Arrenhart e Krause (2012) toda teoria aplica-se a um determinado nível cognitivo, que merece ser investigado do ponto de vista filosófico e, talvez, com finalidades

pragmáticas, portanto faz-se necessária a presente análise histórico-filosófica a respeito da Interpretação de Copenhagen, permitindo assim uma reflexão sobre a ciência e um novo olhar sobre a mecânica quântica.

A existência de várias interpretações sobre a Mecânica Quântica dificulta ainda mais a compreensão dos alunos. Por exemplo, Montenegro e Pessoa Jr (2002) classificam as Interpretações da mecânica quântica em Interpretação Ondulatória realista, Interpretação Corpuscular realista, Interpretação Dualista Realista e a Interpretação Dualista Positivista. Essas distintas interpretações serão apresentadas detalhadamente nos capítulos posteriores, visando uma melhor apresentação ao leitor, para que o mesmo tenha a oportunidade de escolher a interpretação que mais se assemelhe com suas convicções filosóficas, cabe ressalva para a existência de outras interpretações, como a das histórias consistentes, que não serão abordadas nesse trabalho. Entretanto, o enfoque maior será dado a Interpretação Dualista Positivista, a qual será referida como Interpretação de Copenhagen, uma vez que, nesse momento é a mais aceita pela comunidade científica, esperasse que o leitor não se sinta de maneira alguma coagido a aceitar a Interpretação de Copenhagen.

A Interpretação Ondulatória Realista defende que a função de onda quântica corresponderia a uma realidade, essa realidade sofreria colapso cada vez que interagisse com um aparelho de medição. As interpretações de Schrödinger, dos estados relativos de Everett, da decoerência de Zeh e as localizações espontâneas são exemplos de interpretações ondulatórias realistas.

A Interpretação Corpuscular realista afirma que as entidades microscópicas são partículas, sem uma onda associada, defendida explicitamente por Alfred Landé dentro da interpretação dos ensembles estatísticos. Essa visão não explica os padrões de interferência obtidos nos experimentos com elétrons, mesmo assim é muito comum ser encontrada ingenuamente na interpretação de alunos.

A Interpretação Dualista realista foi proposta originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria da onda piloto e ampliada por David Bohm. O objeto quântico se dividiria em 2 partes, uma seria a partícula com uma trajetória bem definida, e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar numa certa direção depende da amplitude de onda associada, o problema da não-localidade surge quando se consideram duas partículas correlacionadas.

Por fim, a Interpretação Dualista Positivista ou Interpretação da Complementaridade de Niels Bohr, defende a existência de uma limitação em nossa capacidade de representar a

nossa realidade microscópica. Conforme o experimento, podemos utilizar uma interpretação corpuscular ou ondulatória, nunca as duas ao mesmo tempo. Mas não podemos afirmar se um objeto quântico é um corpúsculo ou uma onda, segundo a interpretação positivista só podemos afirmar a existência de entidades observadas.

Além das várias Interpretações e dos problemas filosóficos da mecânica quântica, outro grave problema do ensino de química quântica é a falta de material didático que possa ser utilizada no ensino.

O problema não é a quantidade, é a qualidade. Assim como existem os professores improvisados de história da ciência, que não têm formação adequada, há os escritores improvisados. São pessoas sem um treino na área, que se baseiam em obras não especializadas (livros escritos por outros autores improvisados), juntam com informações que obtiveram em jornais, enciclopédias e na Internet, “misturam tudo no liquidificador” (ou no computador) e servem ao leitor desavisado. As obras que resultam desse “esforço” transmitem não apenas informações históricas erradas, mas deturpam totalmente a própria natureza da ciência. Em vez de ajudar a corrigir a visão popular equivocada a respeito de como se dá o desenvolvimento científico, esses livros e artigos contribuem para reforçar e perpetuar mitos daninhos a respeito dos “grandes gênios”, sobre as descobertas repentinas que ocorrem por acaso, e outros erros graves a respeito da natureza da ciência (MARTINS, 2006).

Chaves, Santos e Carneiro (2014) afirmam que o Ensino de Química é tratado de forma anistórica, sem contextualização sócio-histórica e que os livros promovem uma visão de ciência baseada em cientistas ilustres, o que impede o estudante de reconhecer a ciência como uma complexa atividade de reconstrução e apropriação de conhecimento, Silveira e Peduzzi (2006) partilham da mesma opinião ao afirmarem que não podemos dizer que exista uma história da ciência nos livros-texto do ensino médio e também universitário, de um modo geral, mas sim uma caricatura dessa história, sendo consistente com a epistemologia empirista. A maioria dos livros didáticos não exemplifica claramente as ocorrências históricas por trás do desenvolvimento da química (MELO; LIMA NETO, 2013)

A falta de qualidade dos livros didáticos é um sério problema, visto que o primeiro contato dos alunos com a mecânica quântica se dá pelos livros didáticos e suas representações pictóricas sobre orbitais atômicos (PESSOA JR, 2007). Além de ser uma referência básica, representa a principal se não a única fonte de consulta do professor na elaboração de suas aulas (PEDUZZI; BASTOS, 2005).

Ramírez, Badillo e Miranda (2010) chegam a afirmar que até mesmo na formação de professores há a utilização de textos com uma visão deformada de ciência. Formando assim professores despreparados, responsáveis por um ensino que é muitas vezes descontextualizado e abordado superficialmente, impedindo que o aluno tenha interesse pelo fascinante mundo quântico (PARENTE; SANTOS; TORT, 2013).

A utilização de textos complementares confiáveis sobre mecânica quântica, por parte dos professores e alunos, é dificultada pela falta de textos publicados na área. Ostermann (1999) fez uma revisão de literatura sobre Mecânica Quântica no Ensino Médio encontrando apenas 8 trabalhos sobre aplicações da Mecânica Quântica no Ensino Médio. Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) afirmam que a quantidade de artigos está aumentando no geral, mas infelizmente ainda são poucos os trabalhos publicados sobre ensino de mecânica quântica.

2 Questão de Pesquisa

No presente contexto este trabalho visa compreender as questões conceituais e filosóficas da denominada Interpretação de Copenhagen da Mecânica Quântica, a partir de uma abordagem historiográfica, com ênfase nas contribuições de Niels Bohr. Para que isso ocorra, é necessário que se apreenda histórica e filosoficamente o papel ocupado por Niels Bohr no estabelecimento da Interpretação de Copenhagen e as questões conceituais envolvidas na Interpretação de Copenhagen.

Para entender a Interpretação de Copenhagen de maneira eficiente, é necessário apreender as etapas que levaram ao estabelecimento da Mecânica Quântica e seus conceitos fundamentais estruturais, para que isso ocorra, necessita-se compreender os principais problemas filosóficos impostos pela Mecânica Quântica a nível conceitual e em relação aos valores atribuídos à atividade científica.

Esses valores estão diretamente ligados à visão de cada cientista, por isso, é de extrema importância e investigar os principais cientistas envolvidos e suas contribuições para o estabelecimento da Teoria Quântica e entre esses cientistas encontra-se Niels Bohr.

3 A Importância da História e Filosofia da Ciência no Ensino de Química

Para compreendermos de maneira eficaz a participação histórica de Niels Bohr na construção da Interpretação de Copenhagen e as questões filosóficas decorrentes do desenvolvimento da mecânica quântica, faz-se necessário primeiramente analisarmos a importância tanto da história, quanto da filosofia no ensino científico, uma vez que, o desenvolvimento científico está diretamente ligado à formação educacional do cidadão crítico, visto que, o conhecimento científico não é inato, mas é construído pelo estudante.

A História e Filosofia da ciência (HFC) estão sempre interligadas, uma vez que a filosofia aceita pelo historiador afeta diretamente seu modo de ver o material que possui. Como Matthews (1995) afirma, a filosofia da ciência é vazia sem história enquanto a história da ciência sem a filosofia é cega. Essa união entre filosofia e ciência é destacada por Planck (2012), que defende que a diferença entre os estudos em filosofia e em ciência pode ser comparada à que existe entre dois viajantes que caminham a pé, lado a lado, examinando de diferentes maneiras a paisagem desconhecida, profunda e de vasto horizonte: um deixa o olhar livre percorrer tudo à vontade, enquanto o outro olha numa única direção com a ajuda de um binóculo. O primeiro (filósofo) não vê com muita clareza os detalhes, mas numa só olhada percebe a unidade e a diversidade do conjunto, compreendendo melhor certo número de coisas. Já o segundo (cientista) descobre muito mais singularidades, mas possui um campo de visão relativamente estreito, uma vez que, não consegue observar toda a paisagem ao mesmo tempo. Portanto, se os dois compartilharem suas visões poderão observar o mundo em sua plenitude.

Assim, a opção didática pela História da Ciência deve acontecer de forma articulada com a Filosofia da Ciência, a fim de ajudar na análise crítica do conhecimento científico produzido e também na transposição didática dos conteúdos (OKI, MORADILLO, 2008).

Castro e Carvalho (1992) afirmam que a utilização de história da ciência, permite que o aluno passe a ter contato com os aspectos corriqueiros da comunidade científica, que muitas vezes são mascarados pela mistificação da ciência, adquirindo assim, conhecimento dos mecanismos de troca de informações entre pesquisadores e da ocorrência de inúmeras divergências ao longo da construção das ideias, ou seja, a história da ciência possibilita a necessária aproximação metodológica entre a ciência e o ensino científico.

A abordagem contextualista, segundo Matthews (1995) é uma educação em ciência, onde os conteúdos devem ser ensinados em seus diversos contextos, entre eles, podemos citar o ético e o social.

Esta abordagem defende a utilização de história da ciência, visto que, contribui para: motivar e atrair os alunos; humanizar o conhecimento; promover uma melhor compreensão dos conceitos científicos, ao apresentar seu desenvolvimento; demonstrar que a ciência é instável e mutável; se opor a visão de neutralidade científica; apresentar as mudanças nas metodologias de pesquisa.

A utilização de história, filosofia e sociologia da ciência, auxilia a humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da sociedade; além de facilitar o desenvolvimento do pensamento crítico por parte dos alunos, possibilitando um melhor entendimento integral do conhecimento científico e uma melhor formação dos professores, já que permite o desenvolvimento de uma epistemologia de ciência mais rica e mais autêntica (MATTHEWS, 1995). Segundo Suart Jr (2010) a História da Ciência, também pode auxiliar na leitura de como os conceitos foram elaborados e construídos, além de permitir, que o professor possa compreender possíveis dificuldades de seus alunos, tornando-se uma importante ferramenta de avaliação diagnóstica.

Matthews (1995) afirma que o objetivo da HFC, é que o aluno compreenda que existem questões intelectuais à respeito do conhecimento, perguntas a serem feitas a cada teoria, e que assim comecem a refletir não apenas sobre possíveis repostas, mas, sobre que tipos de repostas seriam válidas e como sustentar tais repostas.

Martins (2006) segue essa mesma visão, ao afirmar que a utilização de história e filosofia da ciência nos permite responder determinadas questões, dentre essas questões podemos citar: De que modo às teorias e conceitos se desenvolvem? Como os cientistas trabalham? Quais as ideias que aceitamos hoje em dia? Quais as ideias que eram aceitas no passado? Quais as diferenças e similaridades entre essas ideias? Quais as relações entre ciência, religião e filosofia? Quais as influências dos sistemas políticos e econômicos no pensamento científico? Qual a relação entre o desenvolvimento científico e outros desenvolvimentos históricos que ocorreram na mesma época?

A pesquisa científica, cada vez mais, procura respostas para essas questões. Martins (2007) afirma que ao longo das últimas décadas, a pesquisa em ensino de ciência tem evidenciado a importância da utilização de HFC no ensino e aprendizagem das ciências naturais. Esse aumento de interesse está diretamente ligado, aos programas de Ciência,

Tecnologia e Sociedade (CTS), que foram difundidos nas escolas e nas universidades, e que representam uma importante abertura para as contribuições histórico-filosóficas para o ensino de ciências (MATTHEWS, 1995).

Segundo Oki e Moradillo (2008) a ciência é uma das formas de conhecimento produzidas pelo homem no decorrer da sua história e seu caráter histórico se manifesta nas representações que o homem realiza, inclusive para o próprio conhecimento.

A introdução da dimensão histórica pode tornar o conteúdo científico mais interessante e mais compreensível exatamente por trazê-lo para mais perto do universo cognitivo não só do aluno, mas do próprio homem, que, antes de conhecer cientificamente, constrói historicamente o que conhece. Conhecer o passado das ideias e buscar compreender o progresso delas pode nos ajudar a entender a ciência como um recorte da realidade que se relaciona com outras atividades humanas (CASTRO; CARVALHO, 1992).

A abordagem histórica é recomendada pela primeira vez no Brasil a partir da Reforma Francisco Campos em 1931.

Chaves, Santos e Carneiro (2014) destacam que uma das funções da abordagem histórica seria:

Mostrar que o processo de construção das teorias científicas não é o simples acúmulo de informações, mas uma construção de ideias que envolvem diferentes análises e negociações pela comunidade científica, em um constante processo de revisão dos conceitos científicos vigentes à época, portanto, marcando a ciência como uma atividade caracterizada pela refutabilidade e transitoriedade (CHAVES, SANTOS, CARNEIRO, p. 270).

Segundo Martins (2006) o estudo histórico de como um cientista realmente desenvolveu sua pesquisa nos ensina mais do que qualquer manual metodológico científico, uma vez que esses manuais científicos, que ganharam repercussão após a Guerra Fria, apresentam muitas vezes um enfoque restrito à parte procedimental, renunciando o conhecimento atitudinal, pregando assim uma visão ingênua de neutralidade científica.

Castro e Carvalho (1992) destacam que a utilização de história da ciência possibilita o ensino atitudinal, visto que abre um espaço de discussão em sala de aula, permitindo que o estudante elabore hipóteses, tenha uma opinião baseada em fatos e conceitos, tenha sua convicção posta à prova e aceite possíveis críticas e argumentos contrários à mesma. A partir do momento que o estudante compreende que as pessoas veem as coisas de formas diferentes, a história da ciência pode servir como veículo natural para demonstrar como essa subjetividade também esta presente na ciência e como a afeta (MATTHEWS, 1995).

Heisenberg defendia a necessidade de recuperarmos a noção de filosofia da natureza, na medida em que esta poderia contribuir para a reunião de esferas do saber, entre elas, a esfera científica, a esfera ética e a esfera artística, além da necessidade de um diálogo interdisciplinar entre todas as áreas de conhecimento (HEISENBERG, 2009).

Essa necessidade fica mais ainda evidenciada, uma vez que segundo Matthews (1995) a epistemologia do professor é formada assistematicamente a partir de educação via leitura de livros-texto, gerando preconceitos generalizados que dificilmente serão abalados pela informação histórica, ou pela análise filosófica.

Uma das vantagens para a utilização de História e Filosofia da Ciência é o fato de que, levar a informação histórica para sala de aula poderia ser feita de várias maneiras: através de aulas expositivas, sessões de vídeo, trabalhos de pesquisa bibliográfica ou leituras (CASTRO; CARVALHO, 1992), não necessitando de gastos monetários para a instituição escolar ou para o professor.

Mesmo com o desenvolvimento das pesquisas em ensino e seus inúmeros ganhos, utilizar HFC é um trabalho complexo, é muito mais do que citar nomes e datas, é necessário esclarecer os múltiplos aspectos e interações de cada episódio com o seu contexto mais amplo (MARTINS, 1993). É um trabalho que exige tempo e preparação, que muitas vezes faltam aos professores brasileiros, devido à má formação e a jornada excessiva de trabalho. Matthews (1995) defende a necessidade de novas orientações para os professores, a respeito da prática docente e da avaliação, além de novos livros didáticos e a inclusão de cursos adequados no treinamento de professores.

A mera consideração de elementos históricos e filosóficos na formação inicial de professores, não garante a inserção desse conhecimento nas salas de aula do Ensino Fundamental e Médio, tampouco uma reflexão mais aprofundada, por parte dos professores (MARTINS, 2007).

Ainda que a valorização desses campos na formação profissional tenha crescido, a inclusão desses temas nos currículos ainda segue um modelo tradicional, no qual, geralmente, disciplinas específicas abordam os conteúdos e a articulação com a didática é extremamente frágil. Tradicionalmente, o ensino da História das Ciências por disciplinas específicas não busca fazer uma ampla articulação com conteúdos da Filosofia da Ciência (OKI, MORADILLO, 2008, p. 69)

Matthews (1995) defende a necessidade de uma reestruturação nos currículos escolares. Uma vez que, são repletos de conteúdos e escassos de tempo, gerando um ensino superficial, sem muitos detalhes e muitas vezes baseado na memorização de fatos, números e

fórmulas, levando em consideração a ideia de Mach de ensinar-se menos para que se aprenda mais.

Matthews (1995) afirma que, desde Mach, defende-se que a quantidade de conhecimento necessário para a educação de valor é muito pequena, pois as pobres criaturas que aprendem mais do que deviam, acabam criando uma teia de pensamentos frágeis. Cabe a ressalva de que defender um ensino de qualidade, que leve a formação do cidadão, é defender um ensino que se preocupe com as necessidades da sociedade e do aluno, não basta que o estudante decore resumos de páginas de livros, onde muitas vezes um termo científico de extrema importância é resumido em uma frase, mas é necessário que o aluno compreenda a construção histórica desses termos, as correlações entre os diferentes termos e as suas importâncias para humanidade.

Segundo Matthews (1995) a tarefa da pedagogia é a de produzir uma história simplificada que lance uma luz sobre o conhecimento científico, mas que não seja uma mera caricatura do processo histórico. A simplificação deve levar em consideração a faixa etária dos alunos e todo o currículo a ser desenvolvido pela Instituição escolar.

Segundo Martins (1993) existem várias possíveis justificativas para se ignorar o uso de HFC. O professor da disciplina científica pode estar preocupado em ensinar apenas os conhecimentos atuais e não o passado, abdicando de explicar os métodos que foram utilizados para que este conhecimento conseguisse sua aceitação, as consequências desta aceitação e as opiniões divergentes.

Uma dessas justificativas está diretamente ligada às concepções errôneas de ciência dos professores. Segundo Chaves, Santos e Carneiro (2014):

- A primeira concepção seria a empírico-indutivista, que apresenta as atividades científicas construídas independentemente das relações sociais, fundamentado exclusivamente na observação e na experimentação.
- A segunda concepção errônea seria a aproblemática e anistórica, que apresenta o fato histórico independente do problema que se pretendia resolver, o conhecimento surge como construção episódica.
- A terceira concepção é denominada como individualista e elitista, segundo a qual, a ciência seria obra de personagens geniais e independentes de seu contexto social, econômico, político e cultural.

- A quarta concepção é a descontextualizada que é baseada na mitificação do trabalho da ciência e da tecnologia, reforçando o caráter neutro a interesses e conflitos sociais.
- A quinta concepção é a acumulativa, que é marcada pela exclusão das controvérsias existentes durante o processo de desenvolvimento das teorias científicas, nem o processo de ruptura do conhecimento anterior.
- A sexta e última concepção errônea é a rígida, segundo a qual, o papel essencial do conhecimento científico é a sequência formal de etapas definidas como método científico.

Essas concepções errôneas impossibilitam um ensino científico de qualidade, uma vez que, o professor não compreende a construção histórica e filosófica da ciência, e por não compreender, não é capaz de explicar de maneira apropriada, preferindo muitas vezes omitir essas informações, ensinando apenas conceitos e procedimentos.

Matthews (1995) afirma ainda que seria no mínimo estranho imaginar um bom professor de literatura que não tivesse conhecimento dos elementos da crítica literária. Da mesma forma, também deve ser estranho imaginar um bom professor de ciência que não detenha um conhecimento razoavelmente aceitável da terminologia de sua própria disciplina, ou nenhum conhecimento dos objetos muitas vezes conflitantes do conteúdo. Estes conhecimentos seriam a diferença entre ser simplesmente treinado em ciências e ser cientificamente instruído, esperasse que o professor seja formado por um processo de instrução.

Matthews (1995) destaca positivamente que, paulatinamente, reconhece-se que a história, a filosofia e a sociologia da ciência contribuem para uma compreensão maior, mais rica e mais abrangente da ciência.

Outro fator que dificulta a abordagem de HFC são às utilizações de pseudo-histórias e pseudo-filosofias, que buscam apenas à mitificação de cientistas, a defesa de determinadas teorias e a glorificação ufanista de uma nação, gerando, por conseguinte, uma visão de ciência acabada, constituída por grandes gênios, sem qualquer base experimental ou observacional. Essas obras apenas atrapalham o desenvolvimento da verdadeira HFC, que não tem o objetivo de valorizar uma pessoa, teoria ou nação, em detrimento de outros.

A verdadeira HFC é baseada na lenta construção de conhecimento, a partir da contribuição de inúmeros pesquisadores, sejam esses, químicos, físicos, biólogos, matemáticos, historiadores, filósofos, religiosos, entre outros, que possuíam como

característica comum, a busca pelo conhecimento. Muitos desses pesquisadores tiveram seus nomes esquecidos ao decorrer do tempo ou tiveram suas contribuições utilizadas pela pseudo-ciência para mitificação de outros pesquisadores mais famosos.

Não ser alertado para o caráter dinâmico do conhecimento científico pode frustrar o aluno em relação à ciência e fazê-lo considerar-se incapaz de pensá-la e assumi-la como uma forma legítima de encarar o mundo. (CASTRO, CARVALHO, 1992). O aluno verá a ciência como algo distante do seu cotidiano, elaborada por pessoas de virtudes e conhecimentos inimagináveis para pessoas comuns, sendo assim, nenhuma informação científica terá importância para o mesmo.

Para evitar que isso ocorra, é necessário que o professor de ciências tenha conhecimento de História, Filosofia e Sociologia da Ciência, para poder auxiliar os estudantes a compreenderem exatamente como a ciência aprende, e não aprende, o mundo real, vivido e subjetivo. Porém, o mais comum é que o estudante fique sujeito à infeliz e difícil escolha entre renunciar ao seu próprio mundo por ser uma fantasia, ou renunciar ao mundo da ciência por ser distante da sua realidade. Entretanto, não podemos nos esquecer, que o mundo dos fenômenos vividos é de extrema importância para a ciência, visto que é nele onde a curiosidade é despertada, essa curiosidade dá origem à busca pelo conhecimento (MATTHEWS, 1995).

As alterações tecnológicas recentes, principalmente no campo da informática, facilitaram a pesquisa científica, alguns periódicos disponibilizam nos meios digitais textos sobre HFC. Localizar e obter documentos de interesse para o historiador de ciência está cada vez mais fácil (MARTINS, 2000), essa disponibilidade de material facilita a pesquisa de qualquer pessoa, que tenha interesse no desenvolvimento científico. Porém, cabe a ressalva de que, além dos vários documentos originais, traduções, artigos de especialistas, a internet por ser um domínio livre, também está repleta de sites que publicam vários textos pseudo-científicos, que apenas apresentam uma visão falsa e enganosa de ciência para o leitor. Segundo Matthews (1995) é melhor não utilizar história do que utilizar-se história de má qualidade.

Mesmo com o avanço da tecnologia, Marques (2010) destaca que ainda são poucos os pesquisadores que se aventuram nessa área, ou seja, na inserção da História da Ciência no Ensino, como exemplo, dos 462 trabalhos aceitos para apresentação no XIV Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Química ocorrido em 2008, apenas 17 trabalhos envolviam pesquisas sobre o eixo temático História e Filosofia da Ciência e Ensino, dos quais

poucos trabalhos eram resultados de investigações diretas em sala de aula, ou seja, a História da Ciência aplicada ao Ensino.

Uma das grandes dificuldades de se escrever textos a respeito da História da Ciência, é o fato de que, a história não se apresenta simplesmente aos olhos do observador; ela necessita ser produzida. Fontes e materiais devem ser selecionados, perguntas devem ser construídas, decisões a respeito da relevância das contribuições de fatores internos e externos para a mudança científica devem ser tomadas. Além, de todas essas questões serem influenciadas pelas visões filosóficas, psicológicas, sociais e religiosas do historiador, outro fator é que a interpretação de um texto reflete as opiniões da época e as opiniões do próprio leitor (MATTHEWS, 1995).

A escassez de trabalhos que fazem uso da abordagem histórico-filosófica, causa inúmeros malefícios para o ensino médio e universitário, já que afeta a formação de futuros profissionais de educação.

O número de artigos reduz ainda mais quando pesquisamos sobre artigos científicos que abordam a utilização de HFC no Ensino de Mecânica Quântica, evidenciando à dificuldade em produzir novas estratégias de ensino-aprendizagem de Mecânica Quântica e o longo caminho a ser traçado pelos pesquisadores de HFC. Essa falta de material acaba muitas vezes induzindo o professor, ou qualquer pessoa interessada no tema, a fazer o uso indevido de textos pseudo-históricos e pseudo-filosóficos escritos por pessoas sem formação na área, que muitas vezes fazem uso de informações enganosas e relatos falsos.

4 Metodologia

Visando-se a produção de um texto que aborde a história e a filosofia da ciência, a metodologia utilizada foi à historiografia. A historiografia é um discurso crítico que procura mostrar as bases epistemológicas, históricas, políticas e axiológicas sobre os quais os discursos históricos são construídos (VIDEIRA, 2007).

De modo geral, quando se faz referência à historiografia, pensa-se, em primeiro lugar, numa análise crítica de obras das histórias da ciência já publicadas, sempre destacando a concepção de ciência empregada pelo historiador para preparar sua narrativa, as questões consideradas importantes pelo historiador e suas respostas, o objetivo por trás das respostas e por fim o público alvo. A história da historiografia da ciência possibilita a compreensão dos caminhos percorridos pela disciplinarização da história da ciência ao decorrer dos anos (VIDEIRA, 2007).

Segundo Kragh (2001) a história da ciência como disciplina autônoma começa a desenvolver-se apenas no século XX. Porém, anteriormente já existiam atividades que poderiam ser consideradas formas primitivas de história da ciência. Sendo baseadas em testemunhos oculares de pessoas presentes no evento, essa abordagem acaba se limitando a uma única geração. Por isso, várias informações sobre a cultura grega antiga permanecem desconhecidas, muitas vezes envoltas por mistérios. Os inúmeros escritos perdidos no tempo são uma das grandes dificuldades da historiografia da ciência.

Quando a nova ciência surge nos séculos XVI e XVII a história ainda era vista como uma parte integrante do conhecimento científico. A partir do final do século XVII, pela influência da visão religiosa protestante, o estudo da antiguidade deixa de ser necessário como forma de legitimação do conhecimento presente, diminuindo assim a importância da história.

A história da ciência no século das luzes foi marcada por um otimismo científico e social ingênuo. Deixando de reconhecer a ciência como um fenômeno histórico propriamente dito, resumiu-a em pormenores cronológicos e exposições sumárias. Vários pensadores iluministas da época como Diderot, Turgot e Condorcet defendiam que o estado de perfeição da ciência já fora alcançado, faltando apenas preencher pormenores, portanto seria desnecessário o trabalho histórico.

No século XIX surge certo interesse sobre a história da ciência, sobre tudo para assuntos técnicos, difundindo a convicção que a filosofia poderia aprender com a história da ciência, ao passo que essa última não teria nada a aprender, criando assim uma forma anti-histórica de ciência, que considerava os métodos científicos inequívocos e fonte de todo o

conhecimento. Neste contexto a primeira conferência internacional de história da ciência foi realizada em Paris no ano de 1900.

Videira (2007) afirma que a partir da segunda metade do século passado, generalizou-se o pensamento de que a ciência não seria neutra, encontrando oposição entre os cientistas e filósofos defensores da ciência. Esse pensamento afirmara que a ciência e os cientistas seriam movidos por outros interesses, não relacionados com o conhecimento da natureza e o bem-estar da humanidade. Esse pensamento surge devido ao papel da ciência na produção de artefatos militares em especial na segunda guerra mundial, aliada à sua crescente complexidade conceitual, às tendências tecnológicas e à voracidade por recursos financeiros. A ciência tornara-se incompreensível para leigos, levando a uma crescente onda de temor.

Segundo Videira (2007), entre 1950 e 2000, a história da ciência viveu três fases historiográficas distintas. A primeira fase é caracterizada como positivista e presentista; a ciência é apresentada como um corpo de conhecimento, teleologicamente estruturado e experimental. Sua existência predominou até 1960 principalmente nos Estados Unidos, sendo fortemente marcada pela influência do positivismo comtiano que defendia a ideia de progresso linear, cumulativo e direcionado para a verdade, dependendo da genialidade de grandes homens.

O segundo estágio deriva da influência de Thomas Kuhn a partir de 1962 e da resposta de Imre Lakatos, que reconhece a importância das críticas de Kuhn à Karl Popper, mas não abandona as ideias de Popper, propondo uma nova teoria baseada nos programas de pesquisa. Thomas Kuhn contribuiu para abrir as portas do mundo da história da ciência para outros participantes que não eram originários dos domínios das ciências exatas ou naturais. Já a formulação de Lakatos sempre ficou em uma posição inferior a de Kuhn, devido à grande resistência dos principais representantes da chamada Nova Filosofia da Ciência.

O terceiro estágio é o denominado pós-modernista, que considera a ciência como uma entidade sociológica, configurada por restrições contingentes, veiculada a agentes específicos e práticas locais.

Na atualidade, Martins (2000) admite que a historiografia dos anos 2000 é completamente diferente da de 1900. Destaca que em 1900 a historiografia era eurocêntrica, havia pouco conhecimento ou curiosidade a respeito da ciência desenvolvida no mundo oriental e na América pré-colombiana. Os historiadores utilizavam um número limitado de manuscritos, baseando-se no estudo de um pequeno número de obras publicadas, e era raro que se fizesse alguma análise crítica a respeito da documentação utilizada. O passado era

estudado visando compreender o presente e as investigações eram realizadas muitas vezes por pessoas amadoras, com pouquíssimo treino profissional em história.

A evolução da história da ciência durante as últimas quatro décadas caracterizou-se por uma proliferação de métodos, sem o surgimento de um consenso quanto ao que constitui a disciplina (KRAGH, 2001). Cada método apresenta uma visão diferente de história, de ciência e até mesmo de mundo.

É comum classificarmos história e ciências em 2 níveis. O primeiro nível “H1” (história 1) descreve os fenômenos ou acontecimentos que sucederam o passado, é uma história objetiva, sendo compreendida como o próprio passado ou como fenômenos que realmente ocorreram no passado. Não temos acesso direto a H1, apenas a seus fragmentos que nos foram transmitidos através de fontes de informação. Assim, um outro nível de história, “H2” (história 2) é usada no sentido de análise da realidade, sendo uma interpretação de H1 (KRAGH, 2001).

Se a história em questão trata-se de história da ciência, duas abordagens para a ciência são possíveis em estreita ligação com a definição de história assumida. “C1” (ciência 1) é a coletânea de informações empíricas e formais acerca da natureza, sendo um produto acabado. Já “C2” (ciência 2) diz respeito às atividades ou comportamentos de cientistas, ciência vista como comportamento humano, independentemente desta conduzir ou não a um conhecimento verdadeiro.

O enfoque desse trabalho assume uma história do tipo H2, visto que não temos acesso direto à história real por trás da elaboração da Interpretação de Copenhagen ou às contribuições de Niels Bohr, sendo necessário utilizar textos publicados por cientistas contemporâneos de Bohr, afirmações de Bohr, análises historiográficas sobre a Interpretação de Copenhagen e sobre a mecânica quântica para a construção de uma interpretação sobre o passado. H2 comporta aqui uma ciência do tipo C2, já que se considera a ciência como uma construção histórica e social, um produto inacabado, compactuando-se com a visão de Martins (1993) de que a ciência merece ser estudada, ao lado de outras manifestações culturais, pelo historiador.

Neste sentido, Kragh (2001) apresenta um teste prático para avaliar até que ponto um relato é não-objetivo. Este teste foi proposto por Hermerén, sendo dividido em 5 passos. Primeiramente devemos verificar deficiências no relato, depois verificar se essas deficiências tornam o relato enganoso, fornecendo assim uma imagem distorcida da realidade histórica. Em seguida, identificar os interesses ou facções que têm relação com o assunto tratado. Após,

buscar se o relato favorece uma ou mais dessas facções. Por fim julgar se esse favoritismo é devido ao relato ser enganoso ou favoreceria de igual modo as facções mesmo não sendo enganoso.

Buscando maior confiabilidade, adotar-se-á este teste em uma primeira análise dos principais textos que serão utilizados, tomando aqueles que apresentarem ausência de equívocos que favoreceriam propositalmente determinadas posições.

O estudo da história da ciência efetiva-se com o enfoque do historiador sobre um determinado fato ou período histórico de interesse. Kragh (2001) esclarece que o enquadramento estrutural em que o historiador trabalha inclui a divisão em períodos históricos, portanto, a periodização é um trabalho do historiador e não da história. Os períodos utilizados são normalmente cronológicos de modo que o desenvolvimento é simplesmente acompanhado ao longo de um tempo linear. O autor de um trabalho sobre o desenvolvimento de uma disciplina terá sempre de escolher qual período de tempo dar ênfase. Neste aspecto, o presente trabalho abrangeu o período desde 1895 até a formulação da Interpretação de Copenhague em 1927 e os posteriores comentários de aceitação e rejeição.

Para a interpretação dos fatos a historiografia da ciência apresenta duas visões distintas que Kragh (2001) classifica como visões anacrônicas e diacrônicas. Na visão anacrônica admite-se que a ciência do passado deve ser estudada à luz do conhecimento que temos hoje na intenção de compreendermos esse último desenvolvimento, particularmente, quanto ao modo que conduz ao presente, o que caracteriza uma visão presentista da história. Essa visão também pode ser chamada de interpretação Whig da história, terminologia criada por Herbert Butterfield, quando esta modalidade é caracterizada por apresentar os momentos vencedores da ciência e a ratificação do presente.

Por outro lado, o ideal diacrônico consiste em estudar a ciência do passado à luz das situações e das opiniões que verdadeiramente existiram no passado, desconsiderando ocorrências posteriores ou desconhecidas à época. Imaginamo-nos como observadores no passado e não simplesmente do passado. O historiador diacrônico não está interessado em avaliar se os agentes históricos produziram conhecimento verdadeiro num sentido moderno. A única coisa que interessa é saber até que ponto as ações do agente foram consideradas racionais e verdadeiras na própria época do agente.

Neste aspecto, o trabalho fez uso da união entre essas duas visões distintas da história da ciência, visto que, permitindo assim uma análise geral do passado e uma análise crítica sobre as contribuições do mesmo para o presente, ressaltando o contexto social, político e

cultural do passado. Segue-se a visão de Kragh (2001) de que ambos os elementos deverão estar presentes em um trabalho, pois o historiador deve ao mesmo tempo respeitar os pontos de vista diacrônicos e anacrônicos, em conflito, evitando assim os riscos de não compreender o passado ao apenas estudar o futuro, ou de apresentar uma visão arqueológica baseada exclusivamente no passado que apenas um especialista compreenderia.

As abordagens históricas da ciência implicam perspectivas, finalidades e métodos para organizar os materiais particulares, que não originam no próprio passado objetivamente dado. As abordagens podem ser classificadas de acordo com suas ideologias, em ideologia externalista ou internalista (KRAGH, 2001).

A abordagem externalista tem como alvo o público leigo e os corpos políticos. Os defensores dessa abordagem procuram legitimar a ciência, invocando exclusivamente argumentos de utilidade cultural, econômico ou social. Esta nos permite compreender a contribuição da comunidade científica no desenvolvimento da Interpretação de Niels Bohr, além de possibilitar a verificação de como os fatores socioeconômicos afetaram no seu desenvolvimento. Entretanto, a visão externalista nos impossibilita de compreender os conceitos por trás da Interpretação de Copenhagen, tornando-se apenas um trabalho histórico descritivo.

A abordagem internalista é dirigida exclusivamente à comunidade científica. Os defensores dessa abordagem acreditam que a ciência não necessita de fatores externos, seu desenvolvimento só pode ser explicado através da lógica e da experimentação. Isto nos possibilita compreender os conceitos envolvidos na Interpretação de Copenhagen e as questões conceituais sobre a mecânica quântica, mas impossibilita a compreensão do papel de Niels Bohr e dos demais cientistas da época, tornando-se um mero trabalho científico descritivo.

Nesse aspecto, o presente trabalho utilizou ambas as abordagens, visto que, para uma compreensão histórico-científica adequada da Interpretação de Copenhagen, necessitasse das duas visões, além de que o objetivo desse trabalho é debater os aspectos da teoria de Bohr tanto para leigos, quanto para cientistas.

Dentro da historiografia da ciência outro aspecto importante a se analisar é o acesso e uso das fontes. Segundo Kragh (2001, p.133):

Uma fonte é um elemento do passado, objetivamente transmitido, material, criado por seres humanos. Para que uma relíquia adquiria o estatuto de fonte tem de ser uma prova do passado, dizer-nos algo sobre o passado, fornecendo de forma latente

a informação. É o historiador que transforma a relíquia em fonte através da sua interpretação.

Segundo o mesmo autor podemos dividir as fontes em primárias que são provenientes da época sobre a qual revela a informação e, como tal, tem uma ligação direta com a realidade histórica, e em secundárias que são originadas num período posterior àquele de que é fonte e tem por base fontes anteriores, primárias. O presente trabalho fez uso tanto de fontes secundárias, buscando sempre analisar possíveis erros de tradução, além da realização do teste de Hermerén.

No próximo capítulo, será abordado o surgimento da Mecânica Quântica, com destaque para a origem dos quantas de energia, efeito fotoelétrico e o modelo atômico de Niels Bohr.

6 Histórico dos antecedentes da Interpretação de Copenhagen

A Interpretação de Copenhagen é uma compreensão da teoria quântica, portanto antes de apresentarmos a Interpretação de Copenhagen e seus críticos, necessitamos explicar historicamente o surgimento da mecânica quântica.

Historicamente, a Mecânica Quântica, enquanto teoria científica formal se configurou a partir de resultados experimentais obtidos entre os séculos XIX e XX. Esses resultados não poderiam ser explicados pela Física Clássica desenvolvida no século XVIII e XIX (PAULO, 2006).

A origem da teoria quântica está diretamente ligada a um fenômeno bem conhecido que não pertencia as partes centrais da física atômica. Qualquer pedaço de madeira, quando aquecido, torna-se incandescente, primeiramente avermelhado e depois esbranquiçado a temperaturas mais elevadas. Trata-se de um fenômeno bem simples, que deveria ter uma explicação simples, com base nas leis clássicas conhecidas da radiação e do calor. As tentativas de Lord Rayleigh e Jeans, entretanto, revelaram inúmeras dificuldades para explicar esse fenômeno (HEISENBERG, 1987).

A radiação emitida pelos corpos se constituía em um problema importante para a expansiva indústria siderúrgica da época, visto que para a confecção de ligas de alta qualidade era necessário saber a temperatura de uma mistura de metais incandescentes (PAULO, 2006).

Lord Rayleigh, com o auxílio de James Jeans, investigou essa questão, que era denominada de radiação do corpo negro, baseando-se na Mecânica Clássica Estatística de Maxwell-Boltzmann. O método de pesquisa de Rayleigh consistia primeiramente em calcular o número de ondas estacionárias de um sistema e o próximo passo foi calcular a energia total média associada a cada onda estacionária (STUDART, 2000).

Ao compararmos a equação de Rayleigh-Jeans com os resultados experimentais, no limite de baixas frequências, os valores previstos pela equação eram próximos aos valores de energia obtidos experimentalmente. Porém, à medida que a frequência crescia, os resultados teóricos tendiam ao infinito, um resultado impossível, visto que a densidade de energia sempre permanece finita (Figura 1). Paul Ehrenfest populariza essa falha como “catástrofe do ultravioleta”, devido ao fato de que, os “erros” ocorriam em frequências características do comprimento de onda ultravioleta (ESBERG, RESNICK, 1988).

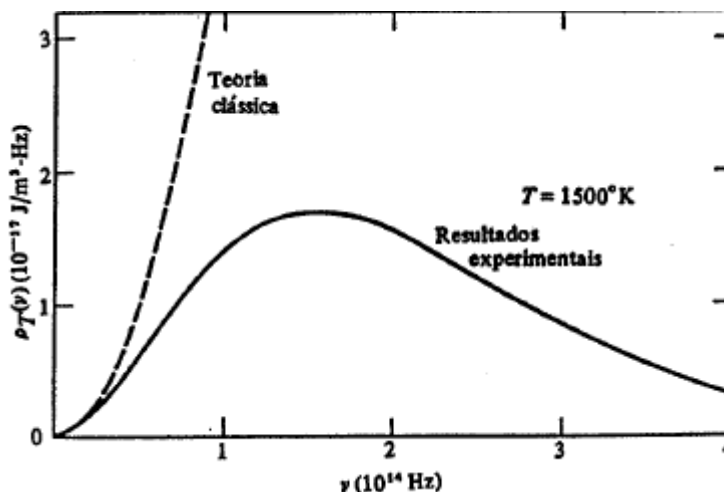


Figura 1 Comparação entre os valores previstos por Rayleigh Jeans e os obtidos experimentalmente.

Fonte: Esberg e Resnick, 1988, p. 32

A partir dos resultados experimentais de Tyndall, Josef Stefan concluiu em 1879 que a energia total é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Boltzmann demonstrou rigorosamente que a teoria de Stefan estava correta e para esse fim, utilizou a teoria eletromagnética de Maxwell considerando a radiação como uma máquina térmica, sujeita as leis da termodinâmica, surgindo a Lei de Stefan-Boltzmann (STUDART, 2000).

Planck (2012) afirma que a vida e obra inteira de Ludwig Boltzmann, representam um dos mais belos triunfos da pesquisa teórica. Boltzmann relacionou o conceito de entropia com o de probabilidade. A natureza prefere os estados mais prováveis, não os menos prováveis, realizando transformações que vão ao sentido do aumento de probabilidade. O calor se propaga de um corpo de temperatura elevada para outro mais frio porque um estado com distribuição uniforme da temperatura é mais provável que aquele em que há desigualdades de temperatura.

De maneira geral matéria e radiação interagem e atingem o equilíbrio termodinâmico por meio das trocas de energia. Ritchie, em 1833, verificou a relação entre emissão e absorção total e em 1859 Gustav Robert Kirchhoff prova que para raios de mesmo comprimento de onda e mesma temperatura, a razão entre potência emitida e absorvida é a mesma para todos os corpos (STUDART, 2000).

A partir do desafio de se encontrar uma fórmula precisa e bem fundamentada da distribuição espectral, Planck em 1895, iniciou suas pesquisas nesse domínio, procurando concentrar-se no átomo radiante ao invés da radiação por si mesma (HEISENBERG, 1987). Planck que foi aluno de von Helmholtz e de Kirchhoff, iniciou sua pesquisa ao investigar o problema da radiação do corpo negro. Max Planck conhecia o teorema de Kirchhoff, que afirmara que a radiação possuía um caráter universal, e a questão principal da pesquisa seria

determinar como a radiação e a matéria interagem e atingem o equilíbrio. Planck utilizou em suas pesquisas um sistema conservativo formado de radiação eletromagnética e uma coleção de osciladores harmônicos, os quais nomeou como ressonadores. Esses ressonadores representavam os átomos presentes na superfície interna da cavidade do corpo negro (STUDART, 2000).

Entretanto, Jammer (1966) afirma que a grande inspiração de Planck foram os trabalhos de Clausius, e que as medições experimentais realizadas por Lummer e Pringsheim foram responsáveis por chamar a atenção de Planck a respeito do problema da radiação do corpo negro.

Segundo Feldens, Dias e Santos (2011), a Lei de Wien, que era um resultado experimental bem estabelecido e, um método de cálculo, que consistia em achar a entropia, levaram Planck a quantização de energia. A Lei de Wien, que foi demonstrada por Wilhelm Wien em 1893, defendia que o comprimento de onda, no qual a intensidade da radiação é máxima, varia de acordo com a temperatura (STUDART, 2000).

Em 1899, Planck provou um teorema bastante importante que relaciona a densidade de energia e a energia média do conjunto de osciladores harmônicos que representava os átomos da superfície interna da cavidade do corpo negro em equilíbrio termodinâmico (STUDART, 2000). O teorema é dado pela seguinte fórmula:

$$p(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \bar{u}(\nu, T) \quad (1)$$

O termo $p(\nu, T)$ representa a densidade de energia, o fator de correlação é dado pela frequência do oscilador ao quadrado vezes 8π , dividida pela velocidade da luz elevada a terceira potência. A energia média da equação é representada pelo termo $\bar{u}(\nu, T)$.

Como a radiação e os osciladores estão em equilíbrio, a frequência possui duplo significado, representando tanto a frequência incidente, quanto uma possível frequência dos modos de oscilação dos átomos na parede da cavidade (STUDART, 2000).

Segundo Esberg e Resnick (1988) a grande contribuição de Planck surgiu, quando ele propôs que para eliminar as discrepâncias que levavam à catástrofe do ultravioleta, era necessário modificar o cálculo, tratando a energia como uma variável discreta em vez de contínua, como sempre foi na física clássica. Planck supôs que a energia só poderia ter valores discretos uniformemente distribuídos.

Todavia, essa suposição somente foi possível após Planck ter conhecimento dos trabalhos de Curban e Rubens, visto que, o mesmo foi convencido da inadequação da lei da

radiação de Wien. Segundo Martins e Rosa (2014) Max Planck antes do encontro com Curham e Rubens sempre acreditou na veracidade da teoria de Wien, mesmo que esta não tivesse sido deduzida. Em 1897, Planck procurou encontrar uma demonstração da validade da lei de Wien. Por intermédio da equação que correlaciona densidade de energia e energia média, Planck conseguiu obter a fórmula de Wien.

Martins e Rosa (2014) chegam a afirmar que até o início de 1900, a principal contribuição de Planck à teoria do corpo negro era ter provado a veracidade da lei de Wien, que era considerada anteriormente como uma mera analogia. Mas, as medidas realizadas por Otto Lummer e Ernst Pringshem deram resultados diferentes do previsto por essa lei em baixas frequências.

Planck teve de rever os processos que levavam a formulação da lei de Wien, para que pudesse originar uma nova fórmula que funcionasse tanto para baixas temperaturas, quanto para elevadas temperaturas. Portanto, Planck buscava interpolar a equação de Rayleigh-Jeans e a lei de Wien. Segundo a física clássica, a Energia Interna de um sistema é proporcional a temperatura. A partir de correlações matemáticas, Planck inferiu que a Entropia seria proporcional ao logaritmo da Energia Interna de um sistema. Essa interpolação, embora seja matematicamente simples, foi uma das contribuições mais importantes e memoráveis de todos os tempos na história da física. No início, a formulação de Planck era considerada como unicamente empírica, dado que não possuía uma justificativa teórica adequada (JAMMER, 1996).

No verão de 1900, Curham e Rubens, em Berlim, fizeram medidas muito precisas do espectro de radiação térmica. Planck tentou reproduzir essas medidas teoricamente por fórmulas matemáticas simples que pareciam plausíveis. Planck convidou Rubens para um chá em sua casa e tiveram a oportunidade de comparar os resultados experimentais mais recentes de Rubens com uma nova fórmula sugerida por Planck. A comparação mostrou uma concordância completa. E essa descoberta constituiu-se na lei de Planck da radiação térmica (HEISENBERG, 1987). Planck informou a Rubens o resultado da comparação, na noite do mesmo dia em que a concluiu, por intermédio de um cartão postal (STUDART, 2000). Segundo Jammer (1966), Planck considerava a contribuição de Rubens e Curham vital para o desenvolvimento da teoria dos quanta, chegando a afirmar que sem essa contribuição, o desenvolvimento da mecânica quântica teria se dado de maneira completamente diferente.

Planck havia chegado a sua fórmula, obtendo um valor de energia para baixos valores de frequência, posteriormente obteve valores para altas frequências. Planck necessitava que a

variação da energia fosse uma função crescente da frequência, e após alguns cálculos, concluiu que a correlação entre a densidade de energia e a frequência era uma relação de proporcionalidade. A energia total média é igual ao produto de uma constante, denominada constante de Planck, e da frequência, portanto, a energia e a frequência são diretamente proporcionais. Posteriormente Planck calculou o valor da constante em $6,55 \times 10^{-27}$ erg.s, a qual ficou conhecida como constante de Planck (ESBERG, RESNICK, 1988).

Segundo o filho de Planck, seu pai lhe falara sobre suas novas ideias, durante uma caminhada num bosque do subúrbio de Berlim, denominado de Grunewald. Nesse passeio, ele confessou que teria feito uma descoberta de primeira ordem, comparável talvez somente às descobertas de Sir Isaac Newton. Planck não gostava da ideia da necessidade uma nova formulação para a compreensão da natureza, mesmo assim, publicou seu trabalho em dezembro de 1900 (HEISENBERG, 1987).

Max Planck (1858-1947) contrariou as determinações das Leis Clássicas, ao admitir que as emissões atômicas em uma determinada frequência não ocorrem de forma contínua e gradual, mas em jatos, que só podem ser emitidos quando a energia disponível para isso atinge valores que são múltiplos de um certo valor mínimo dado pelo produto da frequência por uma constante h (constante de Planck) (PIZA, 2003). Esses valores mínimos de energia recebem o nome de quantum elementar de ação.

Tão nova era a ideia de que a energia radiante só poderia ser emitida e absorvida em quantidades discretas que não havia como introduzi-las na estrutura tradicional da física clássica (HEISENBERG, 1987).

A física clássica, que era baseada, nas leis da mecânica newtoniana (Isaac Newton (1642-1727)) e nas leis do eletromagnetismo de James Clark Maxwell (1831-1879), conseguia, de forma unificada e com grande precisão, explicar um grande número de fenômenos tão diversos como os movimentos planetários. Foi uma grande surpresa para a comunidade científica da época, perceber que essas leis falhavam absurdamente quando eram aplicadas ao comportamento dos átomos (PIZA, 2003). Segundo Planck (2012), a sua descoberta do quantum elementar de ação, com um só golpe arruinou para sempre, a esperança da física clássica de eliminar as incertezas que acompanhavam as transições de dentro ou para fora do mundo dos sentidos. Segundo Heisenberg (2009) o objetivo dessa física clássica, destituída por Planck, era descrever o comportamento da matéria no espaço e de suas mudanças no tempo.

Entretanto, Kuhn não considera Planck como fundador da teoria quântica, mas considera Einstein, Lorentz e Ehrenfest como os primeiros a abordar o conceito de descontinuidade quântica, afirmando que Planck foi forçado por outros cientistas a aceitar a ideia de restringir a energia dos ressonadores a um conjunto de valores (STUDART, 2000).

Foi apenas em 1905, com os trabalhos de Einstein, que a teoria de Planck começou a ser reconhecida (STUDART, 2000). Existiam dois problemas em que Einstein poderia utilizar os novos conceitos introduzidos por Max Planck. O primeiro era o chamado efeito fotoelétrico, que consistia na emissão de elétrons dos metais sob ação da luz. As experiências anteriormente haviam mostrado, especialmente as de Lenard, que a energia dos elétrons emitidos não dependia da intensidade da luz, mas tão somente de sua cor ou, mais especificamente de sua frequência. Einstein pode explicar tais resultados ao interpretar a hipótese de Planck quando afirma que a luz consiste em quanta de energia que se propagam através do espaço (HEISENBERG, 1987).

Segundo Bohr (2000), Einstein com uma intuição infalível, foi levado à conclusão de que qualquer processo de radiação implica na emissão ou absorção de fótons (quanta individuais de luz), que apresentavam energia e momento.

O ponto de partida de Einstein foi à ação de uma onda luminosa homogênea, com alguma densidade definida. Depois alterou a intensidade da homogênea luz violeta incidindo sobre a placa de metal e observando até que ponto a energia do elétron emitido depende da intensidade da luz. Pelo raciocínio inicial é previsto que no efeito fotoelétrico uma porção definida de energia de radiação é transformada na energia do movimento dos elétrons. Se iluminasse novamente o metal com luz de igual comprimento de onda, mas de uma fonte mais poderosa, a energia dos elétrons emitidos deveria ser maior, porque a radiação é mais rica em energia, portanto, a velocidade dos elétrons emitidos deveria aumentar se a intensidade da luz fosse aumentada (EINSTEIN; INFELD, 2008).

Mas a experiência contradiz essas previsões. O resultado experimental real é, do ponto de vista ondulatório, surpreendente. Os elétrons observados possuem todos a mesma velocidade e a mesma energia, que não se altera quando a intensidade da luz é aumentada (EINSTEIN; INFELD, 2008).

Einstein postulou que a luz é formada por quantas, que podem ser visualizados como minúsculas partículas de radiação, que eram responsáveis pela emissão dos elétrons, quanto maior a energia dos quanta, maior seria a velocidade dos elétrons ejetados (ABDALLA, 2006). Portanto, Einstein propôs o caráter corpuscular da luz.

A partir do efeito fotoelétrico, fica entendido que aumentar a intensidade da luz significa, em uma nova linguagem, aumentar o número de fótons incidentes. Neste caso, um número diferente de elétrons seria lançado para fora da placa de metal, mas a energia de qualquer um deles não se alteraria (EINSTEIN; INFELD, 2008).

Outro problema foi o calor específico dos corpos sólidos. A teoria tradicional conduzia a valores para o calor específico que concordavam com as observações a altas temperaturas, discordando, todavia, em baixas temperaturas. Einstein aplicou à hipótese quântica às vibrações elásticas dos átomos em corpos sólidos (HEISENBERG, 1987).

Esses dois resultados marcaram um avanço de grande importância, por terem revelado a presença do quantum em diversos fenômenos que nada tinham diretamente a ver com a radiação térmica. Entretanto, Einstein encarava a discrepância entre a mecânica quântica e a clássica como algo que só seria explicado muito tempo depois, não se importando em pesquisar possíveis explicações filosóficas (HEISENBERG, 1987).

Enquanto isso, as experiências de Becquerel, Curie e Rutherford tinham resultado em uma classificação da estrutura do átomo (HEISENBERG, 1987). Entre 1909 e 1911 Rutherford e seus colaboradores Marsden e Geiger realizaram experimentos envolvendo espalhamentos de partículas alfa, núcleos de Hélio formados por 2 prótons e 2 nêutrons, por átomos de ouro. Com o auxílio desses experimentos, em 1911, Rutherford descobriu que o modelo de Thomson estava errado. Rutherford necessitou analisar as linhas espectrais emitidas por um elemento químico particular, para então compará-las com as linhas previstas pelo modelo teórico de Thomson. As tentativas de J.J. Thomson e seus assistentes em explicar as linhas espectrais de diferentes elementos, utilizando seu modelo atômico, geravam resultados desastrosos, devido ao fato de que, as linhas previstas pelo modelo eram muito diferentes das linhas emitidas pelos elementos químicos (ABDALLA, 2006).

Rutherford e seus colaboradores chegaram à conclusão de que o átomo seria constituído por um núcleo de carga positiva e um imenso quase vazio, onde os elétrons orbitariam o núcleo, presos por força uma eletromagnética, descartando o principal modelo atômico da época, o modelo atômico de Thomson.

Segundo Bohr (2000) o reconhecimento da natureza atômica da eletricidade, proposta por Faraday, foi o ponto de partida da moderna física atômica. J.J. Thompson explicou o papel essencial desempenhado pelos elétrons nos mais variáveis fenômenos físicos e químicos, mas o conhecimento das unidades estruturais da matéria só foi completado com a descoberta do núcleo atômico por Rutherford. O modelo era capaz de explicar a

invariabilidade dos elementos nas reações químicas comuns, nas quais o núcleo pesado permanece inalterado, visto que apenas a distribuição dos elétrons ao redor do núcleo é afetada, além de possibilitar a compreensão da radioatividade natural, na qual ocorre uma explosão do próprio núcleo atômico.

A ligação entre átomos diferentes era explicada pela interação entre os elétrons externos de átomos vizinhos. Entretanto, de acordo com as leis mecânicas de Newton, um sistema planetário jamais retornaria à sua configuração original, após a colisão com outro sistema. Mas o átomo de carbono, por exemplo, ainda continua sendo um átomo de carbono depois de uma interação que o ligue quimicamente com outros elementos (HEISENBERG, 1987).

Os modelos também apresentavam um grande problema, a instabilidade eletromagnética. O eletromagnetismo clássico descrito por Larmor prevê que os arranjos de cargas positivas e negativas dos modelos de Nagaoka, Thomson e Rutherford eram instáveis (PARENTE, SANTOS, TORT, 2013).

Bohr introduziu uma série de emendas quânticas à aplicabilidade das Leis Clássicas, sob a forma de um conjunto de regras especiais que deveriam se sobrepor às determinações dessas leis para o movimento dos elétrons no átomo (PIZA, 2003).

A queda contínua e progressiva dos elétrons, prevista pelas Leis clássicas, era impedida pela regra de que apenas determinadas órbitas eram acessíveis aos elétrons. As órbitas permitidas possuem raios e energias bem definidos, são selecionados mediante condições adicionais chamadas de condições de quantização (PIZA, 2003).

Por meio desse novo modelo atômico, Bohr construiu as distribuições eletrônicas dos elementos químicos do número atômico 5 até o 24. E ainda, previu as características do elemento 72. Tal previsão foi confirmada posteriormente por Coster e von Hevesy, que na ocasião eram assistentes de Bohr, o elemento recebeu o nome de háfnio (Hafnia=Copenhague) em homenagem a terra natal de Bohr (BEZERRA, 2013) .

Segundo Silveira e Peduzzi (2006), os defensores do empirismo afirmam que Niels Bohr investiu um grande esforço intelectual para explicar teoricamente porque o átomo de hidrogênio emitia radiação eletromagnética de acordo com a fórmula empírica de Balmer.

Por outro lado, Silveira e Peduzzi (2006) afirmam que as origens da física atômica de Niels Bohr seriam os trabalhos de Faraday no reconhecimento corpuscular da eletricidade e na identificação do elétron, e a descoberta do núcleo por Rutherford. Ramírez, Badillo e Miranda

(2010) afirmam que Niels Bohr teria sido influenciado pela pesquisa de Lorentz acerca da mecânica estatística dos elétrons livres.

O programa de pesquisa de Niels Bohr começa com um problema, que era a estabilidade do átomo de Rutherford, portanto o problema não era explicar as séries de Balmer e Paschen como os empiristas defendiam. Cerca de 1 ano antes da publicação da teoria de Bohr, o mesmo entregou um esboço das suas pesquisas para Rutherford. Nesse estudo já existia tudo o que iria constar na trilogia “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, que seria publicada na *Philosophical Magazine*, apenas não continha as discussões a respeito dos espectros de emissão atômica (SILVEIRA, PEDUZZI, 2006).

A base do programa de pesquisa de Niels Bohr consistia nos seguintes cinco postulados:

B1. A energia irradiada 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.

B2. O equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários é governado pelas leis da mecânica clássica, não se verificando estas leis nas transições dos sistemas entre diferentes estados estacionários.

B3. É homogênea a radiação emitida durante a transição do sistema de um estado estacionário para outro, e a relação entre a frequência ν e a quantidade total de energia emitida é dada por $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck.

B4. Os diferentes estados estacionários de um sistema simples constituído por um elétron que gira ao redor de um núcleo positivo são determinados pela condição de ser igual a um múltiplo inteiro de $h/2$ 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 seja circular, essa hipótese equivale a supor que o momento angular do elétron em torno do núcleo seja igual a um múltiplo inteiro de $h/2\pi$.

B5. 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 $h/2\pi$ o momento angular de cada elétron em torno do centro da sua órbita (BEZERRA, 2003, p. 471).

Segundo Parente, Santos e Tort (2013) o modelo atômico de Bohr foi expandido por Sommerfeld, sendo capaz de explicar os níveis atômicos e as frequências de emissão e absorção dos átomos hidrogenóides, o efeito Stark, o efeito Zeeman normal e o espectro de raio x, além de anteriormente conseguir explicar as séries espectrais de Balmer, Pickering-Fowler, Paschen-Ritz, Lyman, Brackett, e Pfund. Porém apresentava falhas, pois não explicava o espectro do átomo de hélio, o efeito Zeeman anômalo, sendo por fim substituído pela nova mecânica quântica.

Essa expansão não foi realizada exclusivamente por Sommerfeld, mas teve a participação também de William Wilson e Jun Ishiwara, que em conjunto criaram a condição geral de quantização de Sommerfeld-Wilson-Ishiwara, para os sistemas periódicos em termos de integrais de fase, proposta em 1915, que forneceu órbitas elípticas para o modelo atômico

de Bohr. Segundo Bezerra (2003) pode-se afirmar que essa regra de quantização foi um dos postulados mais férteis da antiga teoria atômica, sendo uma importante percussora das condições de quantização utilizadas na nova mecânica quântica.

Em 1924 é formulada a teoria de Bohr-Kramers-Slater (BKS) da radiação, teoria que, por várias razões, ocupa uma posição-limite entre a antiga teoria atômica e a moderna mecânica quântica, sendo uma tentativa de superar as dificuldades da teoria atômica em explicar os processos de interação entre a matéria e a radiação. O problema estava na aparente impossibilidade de conciliar a natureza discreta da matéria com o caráter contínuo da radiação (BEZERRA, 2003).

Para solucionar esse problema, existiam duas hipóteses, a primeira seria a hipótese dos quanta de luz, defendida por Einstein que acarretava a adoção de uma descrição totalmente discreta da natureza, tanto para a matéria como para a radiação. A outra saída seria deixar de considerar as leis de conservação como leis exatas e passar a considerá-las como leis válidas em caráter apenas aproximado, quando se considera um grande número de átomos. Os princípios de conservação da energia e do momento seriam preservados num sentido estatístico, porém não mais nas interações individuais dos átomos com a radiação. Este caminho, fora sugerido em 1919 por Charles Galton Darwin, era o preferido por Bohr (BEZERRA, 2003).

O átomo passava então a ser considerado, para efeito dos problemas de interação matéria-radiação, como um conjunto de osciladores harmônicos virtuais radiantes cujas frequências eram permitidas para transições quânticas naquele átomo (BEZERRA, 2003).

O trabalho BKS consistia numa proposição alternativa à existência do fóton. Sendo uma proposta de conservação de energia apenas no nível estatístico, isto é, a energia seria conservada somente tomando-se uma média estatística dos eventos e não em processos individuais (ABDALLA, 2006).

A teoria BKS teve um efeito estrondoso entre a comunidade científica. Einstein foi um dos mais ardorosos oponentes. As críticas de Einstein eram extremamente fortes e em uma ocasião enviou uma carta a Max Born, afirmando que se a interpretação probabilística da mecânica quântica fosse correta, preferiria ser um sapateiro remendão ou empregado em uma casa de jogos em vez de ser um físico (ABDALLA, 2006).

Arthur Compton, físico norte-americano, foi um dos que ajudaram na resolução do impasse. Derivou a cinemática relativística para o espalhamento do fóton por um elétron, e os estudos experimentais que duraram entre 1923 e 1925, usando uma câmara de nuvens,

permitiram constatar de modo conclusivo a causalidade e a conservação de energia e momento para eventos individuais.

Na primeira década do século XX, o espalhamento de raios X era explicado matematicamente pela teoria clássica de J.J. Thomson. Em 1921, Compton estudou o comprimento de onda da radiação espalhada, comprovando um aumento nesse comprimento de onda. Esse resultado era incompatível com a teoria de Thomson, segundo a qual a radiação espalhada deveria ter o mesmo comprimento da radiação incidente (MARTINS; ROSA, 2014).

Segundo Martins e Rosa (2014), muitos autores erroneamente afirmam que Compton teria sido influenciado pelos trabalhos de Albert Einstein. Porém, em suas obras Arthur Compton nunca fez qualquer menção de Einstein.

Por meio desses resultados experimentais, Compton comprovou a existência de um fenômeno denominado Espalhamento Compton de raios X, no qual uma luz incide no elétron em repouso conferindo-lhe velocidade, sendo espalhada. Depois da colisão, o comprimento de onda da luz aumenta, visto que, houve perda de energia, devido ao fato de que o elétron entrou em movimento (ABDALLA, 2006).

O Espalhamento Compton foi de extrema importância para que a quantização de energia fosse considerada real. Compton mostrou com seus experimentos, que a variação do comprimento de onda de raios X pode ser explicada, se considerarmos que os raios X são constituídos por quanta de energia e momentum (MARTINS; ROSA, 2014). Portanto, a explicação dada por Compton era corpuscular, indo diretamente contra a visão ondulatória estatística do trabalho BKS.

Bohr admitiu seu erro, escrevendo cartas para a comunidade científica e também escreveu uma carta para Slater, pois sentia a consciência pesada por tê-lo persuadido. Slater anos mais tarde tornou público que passara um tempo horrível em Copenhague, devido ao fato de que, era muito difícil para os jovens assistentes lutarem contra o poder imenso da personalidade de Bohr. (ABDALLA, 2006).

A teoria BKS se mostrou ineficiente e sua maior contribuição foi possibilitar o surgimento da teoria de dispersão de Kramers. Entretanto, o próprio Kramers foi hospitalizado após a refutação da teoria BKS.

As teorias de Bohr abriram um novo campo de pesquisa. Desse tempo em diante, os físicos aprenderam a fazer as questões corretas e praticamente todas as questões corretas estavam relacionadas com contradições (HEISENBERG, 1987).

Devido a esta visão, a partir da década de 20, os físicos passaram a discutir as chamadas experiências ideais. Tais experiências foram imaginadas para responder uma questão crítica, sem haver a preocupação de que elas poderiam ser realizadas (HEISENBERG, 1987).

Aumentando assim o número de paradoxos, um desses exemplos era a experiência de Compton sobre o espalhamento de raios X. Pelos dados de experiências anteriores sobre interferência da luz espalhada, a onda magnética incidente fazia o elétron vibrar com uma frequência de onda específica. O elétron oscilante emitia então uma onda esférica de mesma sequência. Compton, em 1923, descobriu que a frequência dos raios X espalhados não coincidiam com a frequência dos raios X incidente. Essa mudança podia formalmente ser entendida admitindo-se que o espalhamento resultasse da colisão de um quantum de luz com um elétron. Nessa colisão a energia do quantum de luz mudaria e, visto que sua energia seria dada pelo produto da frequência pela constante de Planck, essa frequência teria de mudar correspondentemente (HEISENBERG, 1987). Compton comprova assim o caráter corpuscular da luz.

Em 1924, na França, Louis De Broglie procurou estender este dualismo entre as descrições de onda e partícula às partículas elementares que constituem a matéria, começando pelo elétron. Mostrou ele, que uma certa onda de matéria poderia “corresponder” ao elétron em movimento, da mesma maneira que uma onda de luz corresponde a um quantum de luz se propagando (HEISENBERG, 1987).

Como citado anteriormente, na teoria de Bohr, a discrepância observada entre as frequências calculadas dos elétrons e da radiação emitida teve que ser interpretada como uma limitação do conceito de órbita eletrônica, conceito que segundo Heisenberg (1987) já levantara suspeitas desde o começo.

Foi de extrema importância a constatação de que, para órbitas mais exteriores, as frequências de radiação emitida se aproximavam cada vez mais da frequência orbital e de seus harmônicos mais altos. Por outro lado, também Bohr já tinha sugerido em artigos anteriores, que as intensidades das linhas espectrais emitidas se aproximavam das intensidades dos harmônicos correspondentes. Esse princípio de correspondência já se tinha mostrado muito útil no cálculo aproximado das intensidades das linhas espectrais. Dessa maneira dava a impressão de que a teoria de Bohr fornecia uma descrição qualitativa, embora não quantitativa, do que ocorre no interior do átomo e que alguma nova característica do

comportamento da matéria estava sendo expressa pelas condições quânticas, que por seu lado, diziam a respeito do dualismo onda-partícula (HEISENBERG, 1987).

A formulação matemática geral da Mecânica Quântica surge então, como consequência de dois desenvolvimentos diferentes, sendo que o primeiro deles derivou do princípio da correspondência de Bohr e das Expansões de Fourier da órbita (por meio das suas frequências e intensidades propiciam uma imagem das órbitas eletrônicas). As leis mecânicas deveriam ser expressas por equações para frequência e amplitude da transformada de Fourier e não por equações de posição e velocidade do elétron. O segundo seria derivado da ideia das ondas materiais de De Broglie (HEISENBERG, 1987). Esses dois desenvolvimentos diferentes deram origem a Mecânica Quântica como conhecemos e posteriormente a Interpretação de Copenhagen.

7 Interpretação de Copenhagen

No capítulo anterior foram apresentadas as descobertas e teorias que deram origem à mecânica quântica. Com o surgimento da mecânica quântica, várias interpretações distintas se originaram, com o objetivo de criar uma teoria que explicasse tanto o mundo macroscópico, quanto o mundo atômico. A interpretação que recebeu maior aceitação da comunidade científica foi a denominada Interpretação de Copenhagen ou Dualista Positivista.

As bases teóricas para a compreensão da Interpretação de Copenhagen são os princípios da Incerteza de Werner Heisenberg, o da Complementaridade de Niels Bohr e os postulados de von Neumann. Antes de mencionar a visão da Interpretação de Copenhagen sobre determinados assuntos, os questionamentos filosóficos e os debates pelos quais foi afetada, é necessário a explicação detalhada da elaboração dos seus princípios fundamentais.

7.1 Princípio da Incerteza

O princípio da Incerteza é tão importante que Feynman, Leighton e Sands (2008) afirmam que se alguma maneira de vencer o princípio da incerteza for alguma vez encontrada, a mecânica quântica daria resultados inconsistentes e teria de ser descartada enquanto uma teoria válida da natureza.

O autor do princípio da Incerteza foi Werner Karl Heisenberg, que nasceu em Würzburg, uma cidade ao norte da Baviera, sul da Alemanha, em 5 de dezembro de 1901. O pai de Werner, August Heisenberg, tinha sido até então professor de secundário de Línguas Clássicas, e estava para subir um degrau importante da carreira, do ensino secundário para a Universidade, assumindo uma posição de livre-docente da Universidade de Würzburg. August é descrito como uma figura bastante autoritária, bastante contida, mas irascível de caráter por vezes tempestuoso. A mãe de Werner, Anna Wecklein, era filha de Nicolaus Wecklein, diretor do Maximilians Gymnasium de Munique, no sul da Baviera. August a havia conhecido ali, durante um período em que fora professor estagiário nesse colégio, e casou-se com ela em maio de 1889. Anna era inteligente, atenciosa e simples, preocupada com o perfeito equilíbrio e harmonia da família. O avô paterno de Werner, Wilhelm Heisenberg, era um conceituado mestre serralheiro da cidade de Osnabrück, situada mais ao norte da Alemanha, na região da Westfália (PIZA, 2003).

Werner Heisenberg sempre possuiu um temperamento forte, um dos principais motivos para que o mesmo tivesse inúmeros debates com opositores das suas teorias. Esse temperamento acompanhou Werner desde criança. Aos 5 anos de idade, após ser castigado

por um professor com golpes de vara na mão, Werner passou a ignorar qualquer ordem do professor, negando-se a participar de toda e qualquer forma de cooperação com ele (PIZA, 2003).

Uma das principais críticas sofrida por Heisenberg era o abstracionismo matemático de suas teorias, que eram consideradas de difícil compreensão por muitos cientistas da época. Werner sempre teve um ávido interesse por matemática, chegando a aprender sozinho cálculo diferencial e integral, que não faziam parte da ementa escolar da época. Durante seu alistamento na primeira guerra mundial, procurou obter uma prova do último teorema de Fermat e uma das inspirações de Heisenberg foi o livro de matemática de Hermann Weyl (PIZA, 2003). Esse interesse matemático auxiliou Werner a elaborar a mecânica quântica matricial e o princípio da Incerteza. Entretanto, por ser um admirador do trabalho de Weyl, Heisenberg foi rejeitado no curso de matemática da Universidade de Munique.

Heisenberg estudou física teórica na Universidade de Munique, tendo como professor Arnold Sommerfeld (PIZA, 2003), um importante pesquisador atômico e colaborador de Niels Bohr, sendo o responsável por apresentar Heisenberg a Bohr em 1922.

Segundo Piza (2003), Werner Heisenberg teria ficando impressionado com os conhecimentos de Niels Bohr, Werner tinha aprendido os conteúdos de mecânica quântica com Sommerfeld, porém o mesmo ensinamento parecia completamente diferente sendo explicado nas palavras de Bohr, Heisenberg chegara até mesmo a pensar que Bohr havia chegado as suas conclusões a partir de inspiração e intuição. Heisenberg, ao final da terceira conferência, decidiu fazer uma observação crítica à Niels Bohr.

Heisenberg questionou se era lícito esperar que as ideias clássicas pudessem ser utilizadas em condições tão excepcionais com as do átomo quantizado. Bohr o respondeu, afirmando que as representações clássicas do átomo, que desenhara, eram tão boas quanto qualquer representação clássica seria. Sendo um novo campo da física, os velhos conceitos não funcionariam, pois do contrário os átomos seriam instáveis. Contudo, quando queremos falar de átomos, precisamos utilizar palavras, e estas só poderiam ser tomadas dos velhos conceitos (PIZA, 2003).

Como resultado de sua ousadia, Bohr convidou Heisenberg para uma caminhada, durante a qual poderiam discutir melhor. Bohr sugeriu que Werner visitasse Copenhague, onde poderia ficar um semestre e debater mecânica quântica com Bohr e seus aprendizes (PIZA, 2003).

Entretanto, Heisenberg preferiu passar um semestre em Göttingen, onde trabalhou com Max Born em física atômica e estudou matemática com Philip Frank e David Hilbert. Em 1923, após se formar, Heisenberg tornou-se assistente de Max Born.

Na primavera de 1924, Heisenberg fez sua primeira visita a Bohr, em Copenhague, onde ficou por duas semanas. Em julho do mesmo ano, Heisenberg tornou-se livre-docente da Universidade de Göttingen. Para o ano letivo de setembro de 1924 a maio de 1925, Werner recebeu uma bolsa Rockefeller para trabalhar com Bohr em Copenhague, onde trabalhou com o holandês Hendrik Kramers (1894-1952), que era assistente de Bohr. Em 1925, Kramers convenceu Heisenberg da necessidade de afastar-se das ideias da Física Clássica que ainda permaneciam na teoria de Bohr (PIZA, 2003). Esse afastamento da física clássica possibilitou o desenvolvimento da física quântica como conhecemos.

Heisenberg em busca de calcular as intensidades energéticas associadas às diferentes frequências de onda, decidiu introduzir um conjunto de distâncias dependentes de duas energias, cujo quadrado serviria para determinar as intensidades, dado que a intensidade associada a uma frequência tem a ver com duas energias envolvidas no salto de um nível de energia para outro, permitindo obter os valores de energia, não mais um conjunto de órbitas selecionadas pela imposição de regras especiais. Contudo, foi necessário incluir uma versão das condições de quantização de Bohr (PIZA, 2003).

Max Born e seu colaborador, o físico alemão Pascual Jordan (1902-1980), reconheceram logo que Heisenberg, sem se dar conta disso, estava trabalhando com o que os matemáticos chamavam álgebra de matrizes (PIZA, 2003).

Heisenberg comunicou imediatamente os resultados a seu amigo Pauli, mas só informou a Bohr que havia escrito um trabalho sobre mecânica quântica, cerca de três meses depois. Bohr ficou satisfeíssimo com os resultados. Por volta de novembro de 1925, Pauli conseguiu obter as energias quantizadas do hidrogênio usando a teoria de Heisenberg (PIZA, 2003).

Heisenberg tinha 23 anos quando elaborou a Mecânica Quântica Matricial. Na ocasião, estava na ilha de Helgoland tratando de uma forte crise de febre do feno (PIZA, 2003). No mesmo ano, o físico austríaco Erwin Schrödinger desenvolveu um formalismo que se propunha a descrever as características ondulatórias da matéria, sendo denominado de mecânica ondulatória. A equação de Schrödinger, teoricamente, é capaz de descrever o comportamento de uma partícula, ou sistema. (PAULO, 2006).

Piza (2003) cita que Heisenberg concluiu a criação da mecânica matricial graças a seu isolamento em Helgoland, onde não existiam fatores de distração. Heisenberg após confirmar o princípio de energia, teria entrado em estado de excitação, que o fazia errar todos os cálculos seguintes. Somente às 3 da manhã conseguiu concluir seus cálculos. Heisenberg estava tão impressionado com o feito que não conseguiu dormir. Optou por escalar uma torre que existia nas redondezas do local onde estava abrigado.

Heisenberg considerou uma experiência muito estranha ver que os resultados da mecânica newtoniana poderiam ser igualmente derivados. Posteriormente, as investigações de Born, Jordan e Dirac mostraram que as matrizes representativas da posição e momento do elétron não se comutam. Esse último resultado revelou claramente a diferença essencial entre a mecânica quântica e a clássica (HEISENBERG, 1985).

Na véspera do Natal de 1926, Paul Adrien Maurice Dirac, em uma visita prolongada a Copenhague, escreveu uma carta a Pascual Jordan, que na ocasião era assistente de Max Born em Göttingen, afirmando que Heisenberg havia lhe mostrado seu trabalho, sendo equivalente em todos os pontos principais ao trabalho do próprio Dirac. Entretanto, as maneiras de se obter os resultados eram distintas. A interpretação de Dirac foi publicada em primeiro de janeiro de 1927, denominado *The Physical Interpretation of the quantum dynamics*. No dia 18 do mesmo mês, foi publicado um artigo independente de Jordan, denominado *On a new foundation of quantum mechanics*. Esses dois artigos ficaram conhecidos como Teoria de Transformação Estatística Dirac-Jordan (DUNCAN; JANSSEN, 2012).

O formalismo de Heisenberg torna a escrita de equações correspondentes trabalhosas. Aqueles que o adotam em geral o fazem utilizando a notação introduzida por Dirac, na qual as matrizes quadradas (grandezas físicas) são representadas por uma única letra e as matrizes linhas e colunas por meio de operadores denominados Bra e Kets (PAULO, 2006).

Max Born em 1926 publica um artigo, no qual propõe que o quadrado da função de onda seja interpretado como uma densidade de probabilidade que deve ser associada à posição considerada para o elétron. Portanto, os elétrons podem ser encontrados em pontos bem definidos do espaço, mas com probabilidades em geral diferentes para cada ponto, determinadas pelo quadrado da função de onda (PIZA, 2003). A partir de Born a probabilidade não poderia mais ser encarada como algo metafísico, mas como algo que se propaga no espaço e no tempo (PAULO, 2006). Born sempre defendeu que a interpretação de Copenhague deveria ser chamada de interpretação de Copenhague-Göttingen, uma vez que o conceito de probabilidade e a matematização da teoria só fora possível por seus trabalhos e de

outros frequentadores da Universidade de Göttingen, algo sempre rejeitado por Niels Bohr. Cabe a ressalva que o termo Interpretação de Copenhagen fora proposto na ocasião da celebração dos 70 anos de Niels Bohr por Werner Heisenberg, que fora aluno tanto de Born, quanto de Bohr. (PINTO NETO, 2010).

Nos vários meses posteriores ao debate, Heisenberg e Bohr se dedicaram à busca de uma sistematização da Interpretação da Teoria Quântica, levando a inúmeras discussões que continuavam após a meia-noite, sem chegar a nenhuma conclusão satisfatória (PIZA, 2003). Heisenberg sempre se questionava se a natureza seria tão absurda como as experiências atômicas mostravam (HEISENBERG, 1985).

Os debates continuaram até fevereiro de 1927, quando Bohr decide ir esquiar na Noruega, deixando Heisenberg sozinho em Copenhagen. O resultado do esforço de Heisenberg foi um trabalho intitulado “Sobre o conteúdo visualizável da cinemática e da Teoria Quântica”, no qual formula o que viria a ser conhecido como o seu famoso Princípio da Incerteza. O título é uma menção a Schrödinger, que se vangloriava frequentemente da visualizabilidade do seu formalismo em relação ao de Heisenberg (PIZA, 2003).

Heisenberg verificou que a condição de quantização de Bohr, formulada em termos de distância e velocidade com dois índices, impedia teoricamente que a posição e a velocidade de uma partícula pudessem ser simultaneamente bem definidas. Para comprovar essa suposição, Heisenberg utilizou-se da noção de probabilidade de Max Born, calculou as incertezas da distância e da velocidade de uma partícula, seguindo a condição de quantização de Bohr e por fim, concluiu que o resultado do produto da incerteza na posição de uma partícula pela incerteza na sua velocidade não pode ser menor que a constante de Planck, dividida pela massa da partícula (PIZA, 2003).

Segundo o princípio da incerteza, se você fizer uma medida em qualquer objeto e puder determinar o componente x do seu momento com uma incerteza Δp , você não pode ao mesmo tempo saber sua posição x mais precisamente que Δx igual a constante de Planck dividida pela incerteza do momento. As incertezas na posição e no momento de uma partícula em qualquer instante devem ter seu produto maior que a constante de Planck (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008).

Heisenberg chegou à conclusão de que a Incerteza é inerente à medida, ela é inevitável. É impossível medir a velocidade de uma partícula e, simultaneamente, determinar sua posição, sem que a partícula seja influenciada pelos instrumentos de medição (ABDALLA, 2006). Neste caso, encontramos uma natureza determinada. No entanto o

conhecimento sobre os dados é incerto, devido à influência do experimento na medida (SUART JR, 2010). Portanto, a incerteza seria epistemológica, já que não existe naturalmente, somente ganha forma a partir da interação do sujeito com o objeto, sendo considerada por Chibeni (2005) uma concepção operacionalista, naturalmente associada à perspectiva filosófica positivista, que dominou o cenário intelectual da primeira metade do século XX.

Segundo a nova maneira de Heisenberg de representar o mundo, cada evento que pode ocorrer, possui uma amplitude. Se o evento envolver a recepção de uma partícula, então podemos obter a amplitude de se encontrar essa partícula em diferentes posições em diferentes tempos. A probabilidade de encontrar a partícula é então proporcional ao módulo quadrado dessa amplitude. A amplitude de encontrar uma partícula em diferentes lugares em tempos diferentes varia com a posição e com o tempo.

A maior característica da mecânica quântica para Heisenberg é o fato de que, no caso dessas partículas elementares, todo e qualquer processo de observação pressupõe a presença de um aparelho de medida, o qual é responsável pela presença de uma perturbação. A ciência não fala o que é a natureza, nem como ela se comporta independentemente da interação que mantemos com ela. É apenas um, dentre vários elos da interação do homem com a natureza (HEISENBERG, 2009).

O princípio da incerteza nos permite compreender como é possível que a matéria e a radiação tenham comportamento dual. Se tentarmos experimentalmente determinar se a radiação é onda ou corpúsculo, por exemplo, o tipo de experimento que escolhermos acabará realçando um comportamento, afetando diretamente o resultado final (ESBERG; RESNICK, 1988).

A interferência da medição sobre o objeto de pesquisa era claro para Heisenberg, uma vez que, o uso da técnica não se faz sem que se pague um preço por isso. A técnica não modifica apenas o ambiente, mas também nós mesmos. Os nossos sentimentos e valores são, paulatinamente, transformados pelo uso indiscriminado da técnica (HEISENBERG, 2009).

7.2 Princípio da Complementaridade

A física atômica introduz o termo complementaridade a fim de enfatizar que os fenômenos observados em diferentes condições experimentais esgotam, em conjunto, todas as informações definíveis sobre os objetos atômicos (BOHR, 1995).

Segundo Chibeni (1997) o princípio da complementaridade serve para simbolizar a limitação fundamental da física atômica de nossa enraizada ideia de que os fenômenos existissem independentemente dos meios pelos quais são observados.

O princípio da Complementaridade foi proposto por Niels Henrik David Bohr, nascido em Copenhague, no dia 7 outubro de 1885. Sua família vivia numa bela mansão da VedStraden, número 14, bem em frente à sede do Parlamento dinamarquês (ABDALLA, 2006).

A dinastia Bohr surge com o tataravô Christian Baar, um fuzileiro que servira um príncipe alemão nos anos de 1780 e acabou se tornando um cidadão dinamarquês. Tanto o bisavô, quanto o avô de Niels estudaram Teologia. O avô de Bohr, Henrik Georg Christian, era um mestre habilidoso combinava sensibilidade com disciplina. O pai de Niels Bohr, era o filho mais novo de Henrik, formou-se em medicina em 1880, especializando-se em Fisiologia. Aos 22 anos publicou seu primeiro trabalho científico, que versava sobre os efeitos do ácido salicílico no processo de digestão da carne (ABDALLA, 2006).

O pai de Niels era um especialista em experimentação, sendo elogiado por sua meticulosidade e originalidade. Um dos defensores do direito ao acesso à universidade pelas mulheres, Christian ofereceu-se para preparar as classes femininas adultas (ABDALLA, 2006).

Uma das alunas de Christian foi Ellen Adler, proveniente de uma abastada e importante família judia nos circuitos banqueiro e parlamentar. Professor e aluna apaixonaram-se e casaram-se em dezembro de 1881 e foram morar na mansão que pertencia à mãe de Ellen (ABDALLA, 2006).

Segundo Abdalla (2006) nas férias de verão na casa da avó materna, certo dia chegou uma bicicleta quebrada. Niels, com a intenção de consertá-la, desmontou-a toda. Suas tias ficaram nervosas e pensaram chamar alguém para montá-la de novo. Somente o pai de Niels confiava no trabalho do pequeno mecânico, que tinha em torno de 12 anos. Depois de três horas a bicicleta ficou pronta. E Niels descrevia o conserto como se todos estivessem participando da tarefa. Niels sempre reconhecia a cooperação, mesmo que teórica. Por exemplo, mesmo após a morte de Einstein, ao se deparar com algum problema Niels se lembrava do mesmo e pensava como se estivesse debatendo com Einstein.

Niels tinha 15 anos quando o físico alemão Max Planck, no dia 14 de dezembro de 1900, aos 42 anos, anunciou ao mundo a teoria do quantum. Planck propõe que a matéria, ao ser aquecida ou resfriada, absorve ou emite energia térmica descontinuamente. A absorção e a

emissão de energia pela matéria dão-se através de pacotes mínimos de energia bem-definidos. Essa proposta de Planck revolucionou a Física no início do século passado e deu origem ao que hoje chamamos de Física Quântica (ABDALLA, 2006). Bohr, na faculdade presenciou as grandes modificações da ciência da época, permitindo que o mesmo pudesse compreender as novas teorias e modificá-las.

Niels entrou para a Universidade de Copenhagen em 1903 e iniciou os estudos escolhendo a Física como tema principal e Matemática, Química e Astronomia como temas secundários. Seu irmão Harald optou pela Matemática. Em 1907, o pai de Niels foi indicado ao Nobel de Medicina, mas não recebeu a premiação (ABDALLA, 2006).

Em 12 de abril de 1911, aos 25 anos, Niels recebeu o título de doutor, com apresentação pública em 13 de maio. A defesa durou uma hora e meia. O professor Christiansen lamentou que a tese não estivesse escrita em um idioma estrangeiro, pois na Dinamarca não haviam físicos suficientemente informados sobre o tema para julgá-la como merecia. Várias tentativas de traduzi-la foram falhas, o próprio Bohr quis divulgá-la e somente depois da morte de Niels foi que sua tese foi traduzida de maneira eficaz para o inglês (ABDALLA, 2006). Portanto, fica evidente que um trabalho científico não necessita apenas ser bem produzido, mas também necessita de uma boa divulgação e acima de tudo um número suficientemente amplo de leitores, algo que dificulta até hoje a publicação de trabalhos relacionados à mecânica quântica.

Bohr recebeu uma bolsa de estudos da Fundação Carlsberg. No final de setembro de 1911, deixou a família e a noiva, indo a caminho da Inglaterra com a intenção de trabalhar com o físico inglês Joseph John Thomson, diretor do laboratório Cavendish, em Cambridge (ABDALLA, 2006).

Bohr argumentava em Cambridge que, devido aos trabalhos de Planck, a absorção e a emissão de energia pelos átomos de diversos elementos químicos, não poderiam ser tratados como ondas de propagação contínua, mas como discretos pacotes de onda. Entretanto, Thomson não gostava dessas ideias revolucionárias e chegou a fazer comentários desairosos e evitar encontros com Niels (ABDALLA, 2006).

Thomson e Rutherford decidiram que a transferência de Bohr para Manchester, ocorreria em março de 1912. Em um curso de radioatividade em Manchester, Bohr trabalhou no laboratório de Rutherford, bombardeando raios alfa e beta sobre lâminas finas de metal, medindo sua absorção. Porém, seu trabalho foi interrompido devido à falta de amostras de rádio, usadas como fonte de partículas alfa (ABDALLA, 2006).

Aos 36 anos, Niels Bohr recebia o Prêmio Nobel pelas investigações sobre a estrutura dos átomos e sua radiação. Recebeu indicações anteriores em duas ocasiões: em 1920, para dividir com o físico alemão Walter Nernst, e em 1929, para dividir com Coster e Hevesy. Bohr já estava em Estocolmo, quando seus assistentes Coster e Hevesy tiveram certeza absoluta sobre a descoberta do háfnio, elemento de número atômico 72. Coster relatava as conclusões a Bohr por telefone, enquanto Hevesy tomava o trem para contá-las pessoalmente. Bohr esqueceu no hotel as anotações preparadas para o pronunciamento da entrega do prêmio, então acabou contando, informalmente, a descoberta do novo elemento químico (ABDALLA, 2006).

Em 1927, Bohr decide ir esquiar na Noruega, ao voltar de suas férias, retoma as discussões com Heisenberg sobre mecânica quântica. Nas suas férias Bohr comprovou a equivalência matemática da teoria ondulatória com a de Heisenberg, Born e Jordan (PIZA, 2003).

No início Bohr levantou uma série de objeções contra o Princípio da Incerteza, que considerava um caso particular da regra da complementaridade. Mas logo depois, percebeu que não havia diferenças sérias entre ambas interpretações, e o que importava agora era expor os fatos de modo que todos os físicos pudessem compreender (PIZA, 2003).

Durante o Congresso Internacional de Física realizado em Como, em setembro de 1927, em comemoração a Volta, Bohr apresentou pela primeira vez o princípio da complementaridade, visando abranger os traços característicos de individualidade dos fenômenos quânticos e, ao mesmo tempo, esclarecer os aspectos peculiares do problema observacional nesse campo de experiência (BOHR, 1995).

Com o conceito de complementaridade, Bohr considerou a maneira quântica de descrever em seus dois aspectos, de partícula e de onda, como duas descrições complementares da mesma realidade. Cada uma dessas descrições pode ser só parcialmente verdadeira, e limitações devem ser impostas para o uso, tanto do conceito de partícula como do de onda, pois, caso contrário, não haveria como se evitar as contradições. Se levarmos em conta essas limitações, expressas pelo princípio de incerteza, as contradições desaparecerão (HEISENBERG, 1987).

Bohr defendia com insistência a necessidade de distinguir o objeto quântico e o aparelho clássico de medida, a explicação do experimento em si e das propriedades de um sistema quântico, deveriam seguir a linguagem clássica da física, uma vez que, por meio dessa

linguagem é que nos comunicamos com a natureza, além da impossibilidade de se formalizar uma linguagem quântica que explique os objetos macroscópicos.

Bohr enunciou o inédito conceito de probabilidade na Mecânica Quântica. As partículas seriam representadas por funções de onda e passariam a descrever quantidades matematicamente abstratas, indicando apenas as probabilidades de encontrar as partículas em determinado intervalo do espaço (ABDALLA, 2006).

Pelo conceito de complementaridade de Bohr, o conhecimento da posição de uma partícula é complementar ao conhecimento de sua velocidade. Se conhecermos uma dessas medidas com alta precisão, a outra não poderá ser conhecida com a mesma alta precisão. Mesmo assim, precisaremos conhecer ambas as imprecisões a fim de determinar o comportamento do sistema. A descrição espaço-temporal é complementar à descrição determinista desses eventos. A função probabilidade obedece à equação do movimento e a variação dessa função, no decorrer do tempo, fica completamente determinada por essa equação quântica, mas ela não permite uma descrição no espaço tempo. A observação experimental compele a descrição espaço-temporal, mas quebra a continuidade presente na função de probabilidade, por mudar nosso conhecimento do sistema (HEISENBERG, 1987).

Em setembro de 1927, em Como, Itália, anunciou oficialmente seu Princípio da Complementaridade como sendo a coexistência de duas formas, aparentemente incompatíveis e mutuamente exclusivas, de descrever o mesmo fenômeno físico. Para ele, as descrições ondulatórias e corpusculares das partículas elementares são apenas manifestações de uma dada realidade quântica, e ambas as descrições são absolutamente necessárias exatamente por serem complementares (ABDALLA, 2006).

7.3 Postulados de Von Neumann

John von Neumann juntamente com Paul Adrien Maurice Dirac nos finais da década de 1920 e início da década seguinte, forneceram a linguagem matemática da Mecânica Quântica. A geração de físicos de que von Neumann fez parte emergiu em 1930 e, diferentemente da geração de Bohr e Einstein. Esses novos físicos preocupavam-se pouco com os problemas filosóficos. Ansiavam sobretudo ver os resultados da aplicação da recentemente criada Mecânica Quântica a problemas concretos, os quais exigiam uma destreza e perícia nas novas técnicas matemáticas, implicando o conhecimento de espaços de Hilbert e do cálculo spinorial e matricial e a introdução de novos conceitos como a função delta de Dirac (BALSAS, 2013).

A interpretação de Copenhagen possuía uma boa base teórica e filosófica proposta por Niels Bohr e seus colaboradores. Após ser apresentada a outros ramos científicos, essa interpretação conquistou um grande número de adeptos, superando tranquilamente outras interpretações. Contudo, ainda carecia de uma série de provas matemáticas, que comprovassem a impossibilidade das outras interpretações estarem corretas (BALSAS, 2013).

Nesse contexto, surgem os conhecidos “teoremas da impossibilidade” e o primeiro a criar um desses teoremas foi von Neumann em 1932. Esses postulados asseguraram a soberania da Interpretação de Copenhagen, desmotivando qualquer possível nova interpretação da mecânica quântica (BALSAS, 2013).

O primeiro postulado fornece o enquadramento em que a teoria é colocada. Este postulado recebeu o nome de Princípio de Superposição, o qual afirma que a cada sistema físico isolado está associado a um espaço de Hilbert, chamado espaço dos estados de um sistema. O sistema é completamente descrito por um vetor de estado, que é um vetor unitário pertencente a esse estado. O vetor de estado também pode ser chamado de função de onda do sistema físico correspondente (BALSAS, 2013).

Portanto, o estado do sistema é uma descrição que dá a máxima informação sobre o mesmo, sendo possível determinar as propriedades potenciais do sistema que são verdadeiras, as que são falsas (não são atualizadas com medições) e atribuir uma probabilidade as que são indefinidas (BALSAS, 2013).

Este primeiro postulado funciona diretamente como uma resposta a interpretação das variáveis ocultas, que defende que a interpretação probabilística defendida por Niels Bohr seria decorrente da falta de conhecimento do estado completo de um sistema individual. A afirmação de que o vetor de estado descreve um sistema individual serve para diferenciar a Interpretação de Copenhagen da Interpretação dos ensembles² estatísticos, que será detalhada posteriormente.

Este postulado ainda formaliza o chamado Princípio da Sobreposição de Estados, que explica diretamente os fenômenos físicos de interferências, obtidos em inúmeras experiências. John von Neumann nesse postulado, explica esses fenômenos afirmando que devido à propriedade de linearidade dos espaços de Hilbert, toda a sobreposição linear de vetores de estados constitui igualmente um vetor de estado do mesmo sistema (BALSAS, 2013).

O segundo postulado tem como função reger a evolução com o tempo de estado do sistema. Segundo este postulado, a evolução de um sistema quântico fechado é descrita por

² Conjunto de sistemas idênticos.

uma transformação unitária. Os estados que descrevem o sistema, em instantes distantes, estão relacionados por um operador unitário, que só depende desses instantes (BALSAS, 2013).

Entretanto, na realidade, qualquer sistema interage de alguma forma com outros, mas qualquer sistema aberto pode ser sempre comparado como parte de um sistema fechado mais amplo (o Universo) que está sujeito a uma evolução unitária (BALSAS, 2013).

Podemos generalizar o segundo postulado, afirmando que a evolução temporal de um estado de um sistema quântico é regida pela equação de Schrödinger. E as soluções da equação corresponderão aos estados estacionários da energia (BALSAS, 2013).

O Terceiro postulado estabelece a descrição teórica de um estado e as propriedades físicas do sistema que esse estado representa. Este postulado afirma que toda a grandeza física que pode ser medida, também chamada de observável, é associado a um operador linear auto-adjunto que atua no espaço de Hilbert dos estados do sistema (BALSAS, 2013). Portanto, possibilita a utilização de operadores, defendida por inúmeros físicos da época, entre eles Dirac.

O quarto postulado é relativo às medidas dos sistemas quânticos. Sendo o principal ponto de discordância entre von Neumann e Niels Bohr.

Segundo Balsas (2013, p. 87-89):

Von Neumann, em sua obra *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, escrita em 1932, em alemão, não apenas estabelece os fundamentos matemáticos da mecânica quântica, como também desenvolve, especificamente, um tratamento geral do processo de medida para essa teoria, que iria moldar todo o pensamento posterior sobre a interpretação teórica da medida. Portanto, somente depois de 5 anos da apresentação oficial da Interpretação de Copenhague é que surge a formalização matemática do processo de medida, sendo John von Neumann o responsável. Entretanto, somente em 1955, com a tradução da sua obra para o inglês, foi que seu trabalho teve maior divulgação. Essa demora de divulgação facilitou para que os debates entre Bohr e Einstein ficassem no centro das atenções.

A grande contribuição de von Neumann foi romper com a divisão entre o mundo quântico e o mundo clássico, ao acreditar que a única linguagem válida da física era a da física quântica e o que os aparelhos de medidas necessitam ser descritos pelo formalismo quântico, diferentemente de Niels Bohr que defendia a utilização de uma linguagem baseada na física clássica.

O ponto de partida da teoria de von Neumann foi considerar a existência de dois tipos fundamentalmente diferentes de intervenção que podem ocorrer num sistema quântico. No primeiro tipo, o sistema seria sujeito a mudanças arbitrárias de medidas, isto é, experiências atuantes ou medidas, descontínuas, não-causais e instantâneas.

Neste primeiro caso, o sistema apresenta descontinuidade e mudanças arbitrárias, devido ao aparelho de medida interferir diretamente no observável microscópico, gerando assim uma elevada incerteza na medida de qualquer par de grandezas físicas.

Já no segundo tipo de intervenção o sistema sofre mudanças no decorrer do tempo, portanto, descrevendo uma mudança contínua e causal com o curso do tempo, se a sua energia total for conhecida. Estas mudanças obedecem à equação de Schrödinger (BALSAS, 2013). Nesse segundo caso, a observável é macroscópica, portanto, a energia fornecida pelo aparelho de medida é insuficiente para originar uma incerteza elevada, sendo possível realizar medições sem erros consideráveis.

Von Neumann afirma que, no primeiro caso, a evolução do estado quântico é estatística, ou seja, ocorre uma transformação de estados puros em estados estatísticos, devido à incerteza gerada pela medição. Enquanto que, no segundo caso, a evolução ocorre de maneira causal, em que estados puros são transformados em uma mistura de estados (BALSAS, 2011).

O primeiro processo (tipo 1) é temporalmente irreversível, quebrando assim a simetria entre passado e futuro. Essa quebra é destacada por Wheeler, segundo o qual, a onda e o corpúsculo descrevem diretamente diferentes realidades. Apenas quando o observador participante decide se o fenômeno será corpuscular ou ondulatório é que a realidade passada adquire uma existência atualizada; antes disso, é como se o passado não existisse. É errado pensar naquele passado como já existido. O passado é teoria. O passado não tem existência enquanto ele não é registrado no presente (PESSOA JR, 2003).

Por exemplo, a medida da posição de um átomo, só nos mostra onde aquele átomo poderia ter estado em determinado momento, não podemos afirmar o momento anterior a realização do experimento, nem o momento após, apenas podemos inferir a posição em que foi direcionado o átomo, pela interação com o aparelho de medida, essa posição passada somente existe devido a nossa observação. Essa ideia defendida por Wheeler recebe o nome de retrodição.

A teoria de medida de von Neumann descreve como é que o estado do sistema está relacionado com certas propriedades da medida, afirmando que o ato de medição de um sistema envolve necessariamente e inevitavelmente a sua interação com o aparelho de medida. A mecânica quântica descreve, por meio do processo de medição do tipo 2, os acontecimentos que ocorrem em partes observadas do mundo, desde que estas não interajam com a porção que as observa. Se essa interação ocorrer, o processo de medida deverá obrigatoriamente ser do tipo 1. Von Neumann ainda defende a possibilidade da inclusão ou não do observador no aparelho de medida, isto é, a fronteira entre o sistema observado e o observador poderia ser modificada (BALSAS, 2011).

Após diferenciar os dois tipos de intervenção, von Neumann afirma que os resultados possíveis de um observável sobre um sistema descrito, por qualquer estado, no momento em que se efetua a medida, são valores próprios do operador correspondente, sendo chamado de princípio de quantificação. A probabilidade de encontrar o resultado, no decurso de uma medida é dado pela generalização da interpretação probabilística de Max Born, segundo o qual o quadrado da função de onda representa a densidade de probabilidade de uma partícula ser encontrada em um determinado local (BALSAS, 2011).

O quinto postulado descreve como construir o estado de um sistema composto de dois, ou mais, sistemas físicos distintos. Sendo definido da seguinte maneira: o espaço de Hilbert associado a um sistema composto, constituído por dois sistemas físicos, associados a dois espaços, é o produto tensorial³ entre esses espaços. Esse postulado define o emaranhamento dos sistemas quânticos compostos. Se um estado não pode ser decomposto num produto tensorial de dois estados pertencentes, respectivamente, aos espaços individuais de cada partícula, diz-se, então, que o estado é um estado emaranhado. O emaranhamento possibilita a comprovação do princípio de não-localidade quântica (BALSAS, 2011).

O sexto postulado afirma que depois de uma medida que gere um autovalor, o estado do sistema sofre um colapso. Este postulado é uma maneira pragmática de não discutir a fronteira entre o clássico e o quântico (PINTO NETO, 2010).

Portanto, podemos afirmar que John von Neumann possuía algumas opiniões distintas às de Niels Bohr, mas contribuiu para a aceitação da Interpretação de Copenhague com sua formulação matemática, além de defender essa interpretação das críticas de opositores, em especial dos defensores da existência de variáveis ocultas.

³ Espaço vetorial gerado a partir de dois outros espaços vetoriais.

8 Críticas a Interpretação de Copenhagen

Neste capítulo, visa-se abordar as inúmeras críticas sofridas pela interpretação de Copenhagen. Essas críticas constituíram interpretações alternativas, as quais foram mencionadas anteriormente no capítulo 2. Essas Interpretações diferem-se em inúmeros fatores, entre eles podemos citar, o realismo, o comportamento da luz e do elétron e as possíveis incertezas decorrentes da medição, entre outros.

As divergências de pensamento à respeito do mundo quântico geraram inúmeros debates filosóficos, que mobilizaram toda a sociedade científica da época e auxiliaram no desenvolvimento da mecânica quântica como conhecemos.

8.1 Debate Bohr-Einstein

Dentre todos os debates, o mais popular foi o denominado de Bohr-Einstein, esse debate muitas vezes foi alvo de pseudo-histórias, que procuram descrever os participantes como inimigos mortais. Retratam Einstein como um cientista antiquado, preso ao passado ou retratam Bohr como um utilizador da influência e das bolsas de estudo em Copenhagen, para adquirir apoiadores e atacar Einstein. Veremos a seguir que o relacionamento de Einstein e Bohr era, na realidade, de profundo respeito, que os debates eram apenas trocas de opiniões à respeito de um tema, visando o engrandecimento da mecânica quântica, e não prejudicar outros cientistas.

Durante sua visita à Holanda, em abril de 1919, para o encontro nacional de físicos, Bohr hospedou-se na casa dos Ehrenfests. Esse foi o primeiro contato entre ambos, o que permitiu que Paul Ehrenfest percebesse que a pessoa de Niels Bohr era bastante diferente do que imaginava. Pessoalmente, Bohr era gentil, portava um sorriso nos lábios e gostava de sempre explicar suas idéias com uma paciência infinita. A vontade de Bohr de conhecer Einstein era enorme, mas o mesmo não pode comparecer ao evento. Ehrenfest sempre procurou uma maneira de promover um encontro entre Einstein e Bohr, entretanto, o mesmo falhou inúmeras vezes (ABDALLA, 2006).

Bohr e Einstein encontraram-se pessoalmente em 1920, quando este último seguiu para um seminário em Berlim. Einstein ficou encantado com as palavras de Bohr, chegando a enviar uma carta para o mesmo, afirmando que era raro encontra na vida uma pessoa que lhe tenha proporcionado tanta alegria, e que aprendera muito com a atitude de Bohr em relação

aos assuntos científicos (ABDALLA, 2006). Bohr por outro lado, sempre recordava de seus debates com Einstein e de sua posição imparcial (BOHR, 1995).

Ao publicar o trabalho BKS, Bohr questionava como a energia poderia ser conservada, se algumas variações eram contínuas e outras descontínuas, como o elétron saberia quando emitir radiação? Einstein foi um dos maiores críticos do trabalho BKS, ficando muito feliz com os resultados de Compton, que acabaram com as dúvidas e comprovaram que Bohr estava errado. Bohr enviou cartas aos colegas admitindo seus erros (ABDALLA, 2006).

Em 1925, após o fracasso do trabalho BKS, Ehrenfest recebeu Einstein e Bohr em sua casa, Bohr não se importava com o seu fracasso anterior, uma vez que compartilhava da visão de Pyotr Kaptiza, de que a ciência é um jacaré, não olha pra trás, mas sempre direciona-se para frente (ABDALLA, 2006).

Einstein anteriormente havia reconhecido e aceitado de imediato o modelo atômico de Bohr. Entretanto, quando Niels propôs que as partículas seriam representadas por funções ondas e descreveriam quantidades matematicamente abstratas, indicando apenas as probabilidades de encontrar as partículas em determinado intervalo do espaço, Einstein considerou essa idéia perturbadora, pois, o universo de Bohr baseado na probabilidade, onde o acaso desempenhava um papel importante na ocorrência dos fatos, ofendia profundamente sua visão de universo determinista (ABDALLA, 2006).

Einstein, em carta a Schrödinger, chegou até mesmo a intitular a Interpretação de Copenhagen como orgia encharcada de epistemologia, além de ressaltar que possuía pleno conhecimento do singular sucesso apresentado por Bohr e seus seguidores, entretanto, não acreditava na conformidade dessa visão com a sua relatividade geral (FINE 1986, apud CHIBENI, 1997 p. 35-36).

Essas divergências de visão de mundo geraram vários debates entre Einstein e Bohr.. Muitas vezes mediados por outros cientistas da época, como Paul Ehrenfest, além de envolverem toda a ciência da época.

Bohr (1995) afirma que a principal questão em debate era a atitude adotada perante o afastamento dos princípios da filosofia natural, característicos do desenvolvimento inédito da física quântica, que fora iniciada, no primeiro ano do século XX, pela descoberta do quantum universal de ação por Planck.

A partir dessa descoberta, fica evidenciada a característica de atomicidade nas leis da natureza. As teorias clássicas passam a ser idealizações que só podem ser aplicadas de forma inambígua se todas as ações envolvidas forem grandes em comparação com o quantum. A

questão em debate era saber se a renúncia a um modo casual de descrever os processos atômicos seria um afastamento temporário ou um afastamento definitivo (BOHR, 1995).

Bohr defendeu a utilização da probabilidade, porém, com um objetivo essencialmente diferente do conhecido emprego de considerações estatísticas como meio de explicar os sistemas mecânicos de grande complexidade estrutural, já que, na física quântica, nos deparamos com a incapacidade do quadro clássico de conceitos de compreender a indivisibilidade que caracteriza os processos elementares (BOHR, 1995).

Segundo Bohr (1995) o único meio de estimar essas probabilidades era o princípio da correspondência, originário da busca da mais estreita ligação possível entre a explicação estatística dos processos atômicos e as consequências a serem esperadas da teoria clássica. O princípio da correspondência de Bohr buscava aumentar a aplicabilidade das leis clássicas, dado que, Bohr defendia que os velhos conceitos físicos não funcionavam nos novos domínios da física. Entretanto, para explicarmos os novos domínios, deveríamos usar palavras, e estas só poderiam ser tomadas dos velhos conceitos (PIZA, 2003).

O primeiro debate que envolveu um grande número de físicos relacionados à teoria quântica foi suscitado pelo experimento de Stern-Gerlach, no ano de 1922 (Experimento idealizado por Otto Stern e realizado no final de 1921 em parceria com Walter Gerlach na Universidade de Frankfurt). O experimento consistia de um fino feixe de átomos de prata produzido por evaporação em um forno que é colimado por duas fendas em série. Esse feixe então passava entre os pólos de um eletro-ímã que gerava um campo magnético não-homogêneo. Os átomos eram então coletados em uma placa de vidro. A partir desse experimento, constatou-se a formação de duas manchas bem separadas, ao invés de uma contínua, exemplificando a quantização espacial associada ao momento angular do átomo de prata depois que o átomo passou pelo imã. Porém antes de ser detectado, ele ainda não apresentava um momento angular definido (PESSOA Jr, 2003).

Por um lado, esse experimento deu respaldo à ideia de estados estacionários. Por outro lado, Einstein e Ehrenfest acreditavam que o experimento cumulou em dificuldades insuperáveis para qualquer tentativa de se fazer uma imagem do comportamento dos átomos num campo magnético (BOHR, 1995).

Entretanto, os principais debates surgiram após a apresentação do Princípio da Complementaridade, por Niels Bohr, durante o Congresso Internacional de Física, em setembro de 1927. Segundo esse princípio o estudo dos fenômenos complementares requer arranjos experimentais excludentes, e a interação incontrolável dos objetos e dos instrumentos

de medida força-nos a uma renúncia da descrição causal. Einstein na ocasião não esteve presente no Congresso, portanto não teve a oportunidade de questionar o princípio da Complementaridade, que fora aceito pela comunidade científica presente na ocasião (BOHR, 1995).

Entretanto, em outubro de 1927, Einstein esteve presente na V Conferência de Física do Instituto Solvay e vários cientistas estavam curiosos à respeito da sua opinião em relação ao princípio da Complementaridade. Einstein demonstrou uma profunda preocupação em relação à maneira como a explicação causal no espaço e no tempo era abandonada na mecânica quântica (BOHR, 1995).

Einstein propôs em uma das sessões de debate, um experimento mental, constituído por uma partícula que, por um orifício ou uma abertura estreita, passasse através de um diafragma situado a uma certa distância de uma chapa fotográfica. Em virtude da difração de onda, ligada ao movimento da partícula, não é possível prever com exatidão, nessas condições, em que ponto o elétron chegaria à chapa fotográfica, mas apenas calcular a probabilidade de que, num experimento, ele fosse encontrado dentro de uma região qualquer da chapa. A dificuldade de Einstein era o fato de que, se o elétron fosse registrado no experimento num ponto da chapa, estaria fora de questão observar um efeito desse elétron num outro ponto, embora as leis da propagação usual da onda não dessem margem alguma para que esses dois eventos fossem correlacionados dessa forma (BOHR, 1995).

No exemplo acima, a situação não apresenta nenhuma analogia com a aplicação da estatística para lidar com sistemas mecânicos complexos, mas faz lembrar, antes, os antecedentes das primeiras conclusões do próprio Einstein sobre a unidirecionalidade dos efeitos da radiação individual, que contrasta tão vigorosamente com uma imagem ondulatória simples. Mas essas discussões centraram-se na questão de determinar se a descrição da mecânica quântica esgotava as possibilidades de explicar fenômenos observáveis, ou se, como sustentava Einstein, a análise podia ser levada adiante e, em especial, se uma descrição mais completa dos fenômenos poderia ser obtida através do balanço detalhado da energia e do momento nos processos individuais. Para Einstein a descrição defendida por Bohr era incompleta (BOHR, 1995).

Para examinar melhor o pensamento de Einstein, imaginemos uma partícula que penetre por um orifício num diafragma, sem ou com um obturador para abrir ou fechar o orifício. O estado de movimento da partícula à direita do diafragma é representado por uma onda esférica. A descrição desse estado envolve uma certa incerteza no componente de

momento da partícula que é paralelo ao diafragma, e no caso de um diafragma com obturador, uma incerteza adicional da energia cinética. Do ponto de vista das leis de conservação, a origem dessas incertezas entra na descrição do estado da partícula depois de sua passagem pelo orifício pode ser rastreada até as possibilidades de troca de momento e energia com o diafragma ou o obturador (BOHR, 1995). Esse experimento mental fora elaborado pelo próprio Einstein com o intuito de comprovar a inexistência das incertezas

O problema levantado por Einstein foi então saber até que ponto um controle de transferência de energia e de momento, envolvida numa localização da partícula no espaço e de momento, envolvida numa localização da partícula e no tempo, poderia ser usado para uma especificação adicional do estado da partícula depois de ela atravessar o orifício. A posição e o movimento do diafragma e do obturador, até esse ponto, foram presumidos como exatamente localizados no referencial espaço-temporal, implicando assim numa incerteza essencial quanto ao momento e a energia dessas partes do dispositivo de mensuração (BOHR, 1995).

Segundo Bohr (1995), Einstein teria sugerido que o controle da transferência de momento permitiria uma análise mais rigorosa do fenômeno e, em particular, possibilitaria decidir, por exemplo, por qual fenda um elétron teria passado. Entretanto, para Bohr somente a circunstância de nos ser apresentada uma escolha entre traçar uma trajetória de uma partícula ou observar os efeitos de interferência, nos faz ficar diante de uma impossibilidade, na análise dos efeitos quânticos, de traçar qualquer distinção clara entre um comportamento independente dos objetos atômicos sua interação com os objetos de medida que servem para definir as condições em que os fenômenos ocorrem.

A conferência de Solvay, realizada em 1930, foi dedicada aos problemas da teoria quântica. Einstein chegou a essa conferência com um desafio pronto para Bohr: uma experiência mental visando contradizer o Princípio da Incerteza, que impede que as medidas simultâneas de energia e tempo com precisão absoluta. Segundo Bohr (1995), essa discussão foi bastante dramática. Como a objeção à visão de que o controle da troca de momento e energia entre os objetos e os instrumentos de medida seria eliminada se esses instrumentos cumprissem sua finalidade de definir o sistema espaço-temporal dos fenômenos, Einstein defendia ser possível quando as exigências da teoria da relatividade fossem levadas em consideração.

Einstein imaginou uma caixa forrada com espelhos ideais. Colocou dentro da caixa um relógio e alguns fótons e pesou o conjunto. Em uma das paredes da caixa, fez um buraco com

uma portinhola conectada ao relógio. O relógio seria programado para abrir a portinhola por um curtíssimo intervalo de tempo, em um instante escolhido e, se um único fóton escapasse, o instante de fuga seria conhecido com toda a precisão. Depois que o fóton escapasse, a caixa seria pesada de novo. Portanto, o sistema seria pesado antes e depois de o fóton escapar, a massa da caixa seria conhecida nos dois instantes e, usando a fórmula $E = mc^2$, seria possível medir a energia do fóton com toda a precisão e, portanto, o Princípio da Incerteza seria violado (ABDALLA, 2006).

O argumento parecia inquestionável. Visivelmente contrariado, Bohr recolheu-se sem dizer uma palavra sequer. Entretanto, passara a noite em claro e resolvera o problema de Einstein, utilizando a Teoria da Relatividade Geral. Einstein não levava em conta que o processo de pesagem envolve uma imprecisão no deslocamento do fiel da balança, gerando imprecisão na massa e, conseqüentemente, na energia do fóton que escapou. Ao fim do debate Einstein sentiu-se obrigado a aceitar aquela solução, mas, nunca se convenceu genuinamente (ABDALLA, 2006).

Essa reunião foi à última ocasião em que Ehrenfest participou como mediador, sempre com o objetivo de chegar a um acordo com Einstein, chegando a brincar afirmando que o comportamento de Einstein era semelhante ao dos críticos da Teoria da Relatividade. Ehrenfest faleceu em 1933, sem conseguir chegar ao acordo que queria com seu amigo Einstein (BOHR, 1995).

A atitude crítica de Einstein perante as opiniões sobre a teoria quântica foi levada ao conhecimento público, através de um trabalho publicado em 1935 por Einstein, Podolsky e Rosen, com o título: “Pode a descrição quântica da realidade física ser considerada completa?” (BOHR, 1995).

Entretanto, o próprio Einstein criticou a maneira como artigo fora publicado, chegando até mesmo a considerar que o ponto central da obra fora arruinada, pela redação, que ficara a cargo de Podolsky (CHIBENI, 1997).

Podolsky considerava que toda a realidade física deveria possuir uma contraparte na teoria física e que só poderiam ser determinadas experimentalmente. Uma das razões do descontentamento de Einstein foi a estrutura complexa e obscura utilizada por Podolsky para explicar seus argumentos (CHIBENI, 1997).

A conjunção da interpretação perturbativa da medida com a tese da incompletude, apresentadas por Podolsky, formam uma mistura bizarra, pois afirmam por um lado que a Interpretação de Copenhague não fornece certos elementos da realidade física. Entretanto,

admiti-se por outro, que esses elementos se encontram fora do alcance empírico (CHIBENI, 1997).

Segundo Bohr (1995) a argumentação baseou-se no seguinte critério: Se pudermos, sem perturbar um sistema de maneira alguma, prever com certeza o valor de uma quantidade física, existirá um elemento de realidade física correspondente a essa quantidade física. Os autores em sua conclusão afirmaram que a mecânica quântica não fornece uma descrição completa da realidade. Bohr considerava esses problemas semelhantes aos levantados por Einstein em ocasiões anteriores.

Bohr (1935 apud BOHR, 1995, p.74-75) resume sua resposta aos problemas lançados pelo Paradoxo EPR da seguinte maneira:

Do nosso ponto de vista, vemos agora que o enunciado do critério supramencionado da realidade física, proposto por Einstein, Podolsky e Rosen, contém uma ambiguidade quanto ao sentido da expressão “sem perturbar um sistema de maneira alguma”. É claro que, não há como falar numa perturbação mecânica do sistema investigado durante a última etapa crítica do processo de medida. Mesmo nesse estágio, existe, essencialmente, a questão de uma influência sobre as próprias condições que definem os tipos de previsões possíveis acerca do comportamento futuro do sistema. Uma vez que essas condições constituem um elemento inerente à descrição de qualquer fenômeno a que se possa ser chamado de realidade física, veremos que a argumentação dos autores não justifica a conclusão de que a descrição quântica é essencialmente incompleta. Ao contrário, essa descrição, pode ser caracterizada como uma utilização racional de todas as possibilidades de interpretação ambíguas das medidas, compatível com a interação finita e incontrolável entre os objetos e os instrumentos de medida no campo da teoria quântica. Novas leis físicas só surgem a partir da exclusão mútua de quaisquer dois procedimentos experimentais que permitam a definição inambígua de quantidades físicas complementares (BOHR, 1935 apud BOHR, 1995, p.74-75).

Einstein publicou um artigo em 1936, defendendo que a descrição quântica deveria ser considerada meramente como um meio de explicar o comportamento médio de um grande número de sistemas atômicos.

Bohr (1995) destaca que a dificuldade em se chegar a um entendimento mútuo, entre físicos e filósofos e físicos de diferentes escolas, como é o caso de Bohr e Einstein, não é raro, visto que cada um possui uma preferência por um tipo de linguagem, portanto, uma visão distinta de natureza.

Nos anos seguintes, os aspectos mais filosóficos da situação da física atômica despertaram o interesse de círculos cada vez maiores e, em particular, foram debatidos no II Congresso Internacional pela Unidade da Ciência, realizado em julho de 1936, em Copenhague (BOHR, 1995).

Podemos então afirmar que a controvérsia causada pelo debate Einstein-Bohr foi de extrema importância para a consolidação da Mecânica Quântica, além de possibilitar que o conhecimento das quantas fosse transmitido a uma população mais ampla, composta por filósofos, sociólogos, geólogos, biólogos, terapeutas, psicólogos, entre outros.

Os argumentos de Einstein apresentados nesse tópico serviram de inspiração para a elaboração de uma das Interpretações da Mecânica Quântica, que ficou popularmente conhecida como Interpretação das Variáveis Ocultas.

8.2 Interpretação Dualista Realista

Também conhecida como Interpretação das Variáveis Ocultas, foi proposta inicialmente por Louis De Broglie e posteriormente por David Bohm. De Broglie abandonou a sua teoria por aproximadamente 25 anos, visto que, na época, não conseguira explicar o processo de medida quântica, algo que somente foi explicado nos trabalhos de Bohm (PINTO NETO, 2010). Essa interpretação foi defendida por nomes como Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen. Os defensores das variáveis ocultas, juntamente com os defensores da interpretação de Copenhagen, proporcionaram inúmeros debates filosóficos, sempre buscando comprovar seus pontos de vistas.

David Bohm defendia que todo objeto tem sua estabilidade derivada do contato com o meio em que se encontra e das estruturas menores de que são constituídos, lançando dúvidas sobre a visão generalizadora de que a natureza poderia ser descrita por um conjunto de leis que seriam finitas e passíveis de serem descobertas sendo que na realidade, sempre existiriam variáveis ocultas. Portanto, nada foi descoberto empiricamente ainda de modo que permaneça eternamente definido (NICHOL, 2005).

Bohm defendia o desenvolvimento da ciência a partir de tendências contraditórias, devido a duas razões gerais: primeiramente porque haveria sempre a ocorrência de distúrbios promovidos pelo acaso, decorrentes de causas essencialmente independentes; e porque todos os processos sistemáticos que são necessários para a existência dos objetos seriam contraditórios em alguns de seus efeitos ao decorrer do tempo (NICHOL, 2005).

Segundo Bohm, a população mundial não estaria acostumada a relacionamentos invariantes, uma vez que devido ao senso comum, aprendemos a nos referir a árvores, mesas, cadeiras, pessoas, entre outros, inconscientemente como sendo tipos de entidades, que somados a outras entidades, constituem o mundo que conhecemos. Não consideramos essas

entidades como invariantes que, juntamente com as leis e propriedades, foram abstraídas do fluxo total da mudança e do movimento (NICHOL, 2005).

Einstein sempre acreditou que até mesmo no quantum deveria existir elementos precisamente definidos ou variáveis dinâmicas que determinam (como na física clássica) o comportamento real de cada sistema individual, e não apenas o seu comportamento provável. Uma vez que estes elementos ou variáveis não foram incluídos na teoria quântica e ainda não foram detectados experimentalmente, Einstein sempre considerou a forma atual da teoria quântica como incompleta, embora ele admitisse a sua consistência interna. Entretanto, a maioria dos cientistas é contrária às objeções de Einstein, visto que a interpretação de Copenhague com sua noção de probabilidade consegue explicar um grande número de experimentos que nenhuma outra interpretação consegue (WHELLER; ZUREK, 1984).

Uma das principais críticas dos defensores da Interpretação Dualista Realista era o fato de que a Interpretação de Copenhague não dá qualquer possibilidade de se poder determinar o comportamento de um sistema individual ao nível quântico, sem fornecer qualquer prova de que tal renúncia é necessária (WHELLER; ZUREK, 1984).

Na Interpretação de Copenhague o estado de um objeto físico é, nas situações ideais de máxima informação, descrito por funções de onda. Cada função fornece o valor de algumas, porém não de todas as grandezas físicas classicamente consideradas como componentes do objeto. Por esse motivo, essa Interpretação era considerada incompleta, visto que, mesmo nas condições de máxima informação, não é possível atribuir valores simultâneos precisos a todas as grandezas físicas (CHIBENI, 1997).

Von Neumann estudou a seguinte pergunta: Se a atual formulação matemática da teoria quântica e sua habitual interpretação de probabilidade são assumidas para levar a resultados absolutamente corretos para cada um dos experimentos mentais que podem nunca chegarem a serem realizados, as probabilidades da mecânica quântica podem ser entendidas em termos de qualquer distribuição concebível sobre os parâmetros escondidos? Von Neumann respondeu a esta questão com uma negação. No entanto a sua resposta restringiu-se a uma classe excessivamente estreita de parâmetros ocultos. Von Neumann mostrou que seria incompatível com as regras usuais de cálculo probabilidades de mecânica quântica, assumir que exista num sistema observado um conjunto de parâmetros escondidos que permitiriam determinar simultaneamente os valores de posição e momento (WHELLER; ZUREK, 1984). Entretanto, a visão de von Neumann não foi considerada decisiva para os defensores da Interpretação Dualista Realista, uma vez que a distribuição de parâmetros ocultos variaria de

acordo com os diferentes arranjos experimentais mutuamente exclusivos de matéria, que devem ser usados na fabricação de diferentes tipos de medições. Assim, von Neumann não teria analisado todas as opções de variáveis ocultas. Essa crítica ao trabalho de von Neumann começou a ganhar importância, a partir de 1952, através do trabalho de David Bohm (WHELLER; ZUREK, 1984).

Entre os contrários a teoria de von Neumann cabe destaque John Bell, que afirmou que as previsões mensuráveis provadas pela Interpretação de Copenhagen não excluam de modo algum a probabilidade da existência de variáveis ocultas (WHELLER; ZUREK, 1984).

Louis De Broglie um dos primeiros defensores da Interpretação Dualista Realista defendia que objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partículas (PESSOA JR, 2003). De Broglie defendia ainda que a posição e a trajetória dos objetos quânticos teriam realidades independentes da observação (PINTO NETO, 2010).

A Interpretação Dualista Realista explica a interferometria de Mach-Zehnder de um único fóton, da seguinte maneira: o fóton seguiria uma das duas trajetórias, mas simultaneamente a sua onda associada se dividiria em duas partes iguais. Cada parte da onda seguiria um dos caminhos possíveis. A partícula seria um “surfista” e necessitaria de ondas para navegar. Em um dos caminhos ocorre uma superposição destrutiva, portanto, não haveria onda para o fóton se locomover nesse caminho, o que faz com que o fóton seja obrigado a percorrer o outro caminho (PESSOA JR, 2003).

Uma das maiores dificuldades da Interpretação Dualista Realista, foi a sua dificuldade em explicar os experimentos de anti-correlação, uma vez que recorre à proliferação de entidades não visualizadas. Segundo essa interpretação, a partícula seguiu uma das trajetórias possíveis, incidindo então no detector correspondente. Mas existiria também uma onda associada, que se dividiria em duas partes. A parte não detectada constituiria de uma onda vazia que não carrega energia e, portanto, não pode ser detectada. Os defensores dessa visão afirmavam que, em experimentos simples, a proliferação de variáveis identificadas não levaria a nenhuma consequência observacional indesejável (PESSOA JR, 2003) e, portanto, não haveria motivos concretos que impedissem essa interpretação de ser credível como as demais.

A função de onda é vista pelos defensores da Interpretação das Variáveis Ocultas como uma expressão do campo real que guia as partículas. Entretanto, não carrega consigo a

energia, além de estar incompleta devido à ausência das variáveis ocultas. Por outro lado, a redução de estados é vista como natural pela interpretação, dado que se toda medição acabaria envolvendo uma determinação da posição do objeto quântico, as reduções de estado resultariam sempre num auto-estado de posição. Essas reduções poderiam ser interpretadas como a mera detecção da partícula presente em algum lugar da onda piloto. (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação Dualista Realista defende que as superposições podem ser tanto construtivas, quanto destrutivas, ou até mesmo intermediário (PESSOA JR, 2003). Logo, num experimento, a observável pode exibir um caráter corpuscular, um caráter ondulatório, ou até mesmo um caráter intermediário.

As medições de posição são vistas pela Interpretação Dualista Realista, como fidedignas, sempre revelando o valor exato antes da medição. Tal medição provocaria uma alteração rapidíssima na onda associada, o que afetaria de maneira imprevisível o momento. A partícula tem sempre posição e momento bem definidos simultaneamente, só que tais valores são desconhecidos por nós. Se medirmos a posição com boa resolução, teremos obrigatoriamente uma incerteza grande para o momento, por causa desse distúrbio provocado pelo aparelho de medição (PESSOA JR, 2003).

Segundo a Interpretação das Variáveis Ocultas, a ideia de retrodição seria aceitável. Entretanto, as partículas nem sempre seguem trajetórias retilíneas uniformes, mas seguem trajetórias complexas as quais não podemos prever o comportamento (PESSOA JR, 2003).

Uma das vantagens da Interpretação Dualista Realista é a facilidade de explicar os batimentos quânticos, ou experimentos de escolha demorada, que eram uma das principais dificuldades da Interpretação Corpuscular Realista. Os defensores do dualismo realístico afirmam que, mesmo para o estado superposto, o corpúsculo associado à onda tem a cada instante uma energia bem definida, só que oscila com o passar do tempo. A decisão do observador pode alterar instantaneamente a onda associada de um átomo mas, conforme Bell esclareceu, isto não permite que sejam transmitidos sinais instantâneos. (PESSOA JR, 2003).

Um dos fatores excludentes da Interpretação Dualista Realista das demais é o fato de considerar o spin como uma propriedade exclusiva da onda, não como propriedade interna do corpúsculo (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação das variáveis ocultas não é a única interpretação que difere das idéias defendidas por Niels Bohr e a Interpretação de Copenhagen. Temos várias outras visões

distintas da mecânica quântica e seus pressupostos, que serão apresentadas nos próximos dois tópicos juntamente com seus defensores e os fatores que as distinguem de outras.

8.3 Interpretação Ondulatória Realista

A Interpretação Ondulatória Realista é baseada na visão de Erwin Schrödinger, criador da Mecânica Quântica Ondulatória, onde defendia que todos os objetos que conhecemos poderiam ser na realidade ondas. Por exemplo, Schrödinger descrevia o elétron como uma espécie de “onda de matéria”, capaz de ocupar todo o espaço em torno do núcleo. Sua equação descrevia o comportamento dessas ondulações em relação ao tempo (PIZA, 2003).

Erwin Schrödinger nasceu em 12 de agosto de 1887, na cidade de Viena, único filho de Rudolf Schrödinger administrador de uma fábrica de linóleos e Georgine Bauer Schrödinger de descendência inglesa. O avô paterno de Erwin foi Joseph Schrödinger que era professor de química do Instituto Politécnico em Viena (PIZA, 2003).

Erwin desde pequeno teve contato com o mundo científico, crescendo em um ambiente repleto de obras filosóficas, com tutores particulares a sua disposição, uma mãe admiradora de Goethe (PIZA, 2003) um pai formado em química, que se interessava por inúmeras áreas científicas e um avô professor universitário.

Schrödinger elabora a Mecânica Quântica Ondulatória em 1925, na cidade de Arosa, onde teria passado os feriados e o final de ano com uma antiga namorada, enquanto sua esposa estava em Zurique. (PIZA, 2003).

O artigo em que descreve seus resultados foi recebido para publicação pela revista alemã *Annalen der Physik*. Erwin Schrödinger tivera inspiração na tese de doutoramento de Louis de Broglie e em conversas que tivera com Albert Einstein. Segundo Piza (2003), Erwin afirmara até mesmo em seu artigo que sua teoria fora inspirada por De Broglie e por observações breves e infinitamente perspicazes de Einstein. Schrödinger ainda teria citado que sua ideia não tinha qualquer relação com a de Heisenberg, que soubera de sua existência, mas a considerava muito difícil, para não dizer que sentia repulsa pela mesma, devido à falta de transparência de Heisenberg e a utilização de álgebra transcendental.

A importância de Heisenberg foi explicada anteriormente no capítulo específico sobre a Interpretação de Copenhague, na qual foi um dos fundadores e defensores. Um dos prováveis motivos para a repulsa de Schrödinger a essa teoria, seja a diferença de formações de ambos. Erwin era 11 anos mais velho do que Heisenberg e presenciou o surgimento da teoria dos quanta de Max Planck, do efeito fotoelétrico de Albert Einstein. Entretanto, sua

formação foi baseada na física clássica e na termodinâmica estatística. Heisenberg, por outro lado, nascera após o surgimento da teoria de Planck, estudou matemática a partir do livro de Hermann Weyl (1885-1955), que adotava uma visão completamente diferente da matemática tradicional e estudou física teórica com Arnold Sommerfeld, que aperfeiçoou a mecânica quântica antiga de Niels Bohr, a qual fazia uso de saltos quânticos.

A visão de colapsos de onda de John von Neumann contribuiu para o surgimento dessa interpretação. Segundo a visão de von Neumann, antes da detecção, o objeto quântico propagava-se como onda, mas durante a detecção tornava-se mais ou menos localizado, parecendo uma partícula. Durante um certo tempo temos uma onda espalhada, e depois uma partícula, sem que ambos coexistam simultaneamente (PESSOA JR, 2003).

Uma das primeiras questões filosóficas e teóricas, que exigiu um posicionamento das diferentes interpretações, foi o interferômetro de Mach-Zehnder, que foi um aparelho desenvolvido pelos físicos Ludwig Zehnder e Ludwig Mach, por volta de 1892. O interferômetro é constituído por um espelho semi-refletor, que divide o feixe de luz em duas partes iguais, uma transmitida e uma refletida. Cada componente reflete em um dos dois espelhos, e voltam a se cruzar no espelho semi-refletor e por fim chegam aos detectores D1 e D2. Esse interferômetro serviu de inspiração para inúmeros experimentos como interferometria de único fóton, que exemplifica que cada fóton só interfere consigo mesmo, que foi realizado por Grangier, Roger e Aspect, (PESSOA JR, 2003).

Pelas regras da física clássica era previsto que 50% do feixe de luz fosse detectado no primeiro detector e os outros 50% no segundo. Contudo, na realidade, todo o feixe de luz é detectado em um único detector. Isso ocorreria devido à superposição ser construtiva em um dos detectores e destrutiva em outro.

A interpretação Ondulatória Realista explica a interferometria da seguinte maneira: o fóton teria sido dividido simetricamente em 2 meio-fótons ao passar pelo primeiro espelho semi-refletor. Ao passar pelo segundo espelho se uniriam formando novamente um único fóton, conforme previa a Física Clássica Ondulatória (PESSOA JR, 2003), entretanto, não há nenhuma comprovação da existência de meio-fótons.

Outro desafio imposto as diferentes interpretações foi a Complementaridade de Arranjos Experimentais, através de experimentos de anti-correlação, o qual consistia no lançamento de um fóton contra um espelho semi-refletor. Um detector era colocado em cada um dos dois caminhos possíveis e o fóton sempre era detectado em um único detector (PESSOA JR, 2003).

Esse fenômeno era classificado como corpuscular, não porque o fóton é detectado em uma quantidade discreta e bem localizada de energia, mas por apresentar uma trajetória bem definida (PESSOA JR, 2003).

Segundo a Interpretação Ondulatória Realista, após atravessar o espelho semi-refletor, o pacote de onda associado ao fóton se dividiria em dois, o que poderia ser expresso por uma função de onda do tipo $\psi_a + \psi_b$. Porém, se detectar o fóton em D1, a probabilidade de detecção em D2 tornar-se-ia nula instantaneamente. O estado inicial seria reduzido para ψ_b . O estado corresponderia a uma onda de probabilidade real, concluindo-se que ocorreu um processo de colapso de onda.

Outro fator de distinção entre as quatro interpretações é o significado de estado Quântico. O estado quântico seria a realidade, uma representação matemática da realidade, ou um mero instrumento matemático.

A Interpretação Ondulatória Realista interpreta o estado quântico de maneira literal, atribuindo realidade a função de onda. Não existiria nada no Universo além do que escreve o formalismo quântico. Seria uma realidade intermediária, uma potencialidade, que estabelece apenas probabilidade, que mesmo assim evolui no tempo como uma onda (PESSOA JR, 2003). Essa visão se assemelha a dos deterministas, ao afirmar que mesmo a probabilidade evolui em função do tempo, o aumento da probabilidade teria um vínculo direto com o decorrer do tempo, portanto seria uma ligação causal entre ambos.

O maior problema dessa Interpretação é que para N objetos quânticos, a função de onda é definida em um espaço de $3N$ dimensões (PESSOA JR, 2003). Portanto, se por exemplo, em um laboratório trabalhássemos em um experimento com 4 objetos quânticos, a função de onda seria definida em um espaço de inimagináveis e inobserváveis 12 dimensões.

Os experimentos de interferometria levaram a mais uma divisão das distintas interpretações ao questionar o motivo do desaparecimento das interferências típicas ondulatórias ao medirmos a trajetória de um fóton.

Segundo a Interpretação Ondulatória Realista, sempre que uma medida é realizada, e um resultado obtido, a onda, previamente espalhada, sofreria uma redução inesperada, passando a se localizar próximo de onde foi localizado primeiramente o fóton e a onda desapareceria completamente do local oposto (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação Ondulatória Realista considera a redução de um estado quântico como um colapso real da onda de probabilidade. O grande problema é que esse colapso seria não-

local (PESSOA JR, 2003) e uma medição feita em qualquer outra sistema solar poderia afetar simultaneamente a nossa realidade.

A Mecânica Quântica representou uma mudança no conceito de medição. A partir da criação da Mecânica Quântica a interação entre observador e objeto ganha importância. A influência que os aparelhos de medida exercem sobre o objeto de pesquisa passa a ser debatido por inúmeros cientistas, surgindo várias visões distintas dessa possível interferência.

Os defensores da Interpretação Ondulatória Realista afirmam que não podemos atribuir um valor bem definido para a posição de um objeto quântico que esteja em uma superposição de auto-estados de posição, a não ser que essa esteja fortemente centrada. Após a medição, ocorreria um colapso de onda que espalharia a onda, para longe do centro. Após a medição, o observador teria um valor bem definido para a posição depois de ter feito a medida, mas não teria nenhum valor preciso de posição antes da medida ser realizada (PESSOA JR, 2003).

O princípio da Incerteza, um dos principais elementos da Interpretação de Copenhague, foi proposto por Werner Heisenberg e o mesmo foi detalhado de maneira mais eficaz, no capítulo específico destinado a Interpretação de Copenhague. Segundo Pessoa Jr (2003) a Interpretação Ondulatória Realista, atribuíria uma realidade apenas para o pacote de onda, δx mede a extensão do pacote, indicando a posição x do objeto quântico é indeterminada ou mal medida por uma quantidade δx . Se x for bem definido δx , é mal definido, e vice-versa. Portanto, podemos afirmar que de certa maneira a interpretação concordava com o Princípio da Incerteza.

Uma das maiores críticas a Mecânica Quântica era relacionada à inexistência do passado proposta por Wheeler, segundo a qual o passado seria modificado a partir do resultado experimental visualizado no presente.

A Interpretação Ondulatória Realista não aceita essa visão, a medição dos estados não altera os estados do passado, visto que, após a primeira medição, o estado do sistema passa a ser uma superposição de auto-estados.

As questões a respeito da composição e energia atômica sempre intrigaram os cientistas ao longo dos anos, uma dessas questões que surge na Mecânica Quântica foi a de que: O átomo teria ou não energia sempre discreta?

Essa questão surge após a descoberta do efeito Zeeman em 1896, que comprovava que o átomo encontra-se em uma superposição de estados com energias bem definidas (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação Ondulatória Realista explica o efeito Zeeman da seguinte maneira: Se o estado do átomo for um autoestado de energia, então ele obviamente tem energia bem definida, mas se o estado for uma superposição, então ele não tem energia bem definida, mesmo que façamos uma medição desta energia. Segundo a versão ingênua desta interpretação, a decisão do cientista com relação ao que medir determina qual estado final que se segue ao colapso instantâneo no estado do átomo. O passado não muda com a ação do presente, mas a escolha feita no passado altera o presente (PESSOA JR, 2003).

O último fator de discórdia entre as várias teorias corresponde à função e a existência do último número quântico, denominado como spin. Segundo a Interpretação Ondulatória Realista o spin corresponderia a um termo assimétrico derivado do momento magnético, independente da distribuição de cargas.

No próximo tópico será abordada a maneira como a Interpretação Corpuscular Realista explica as mesmas questões citadas no presente tópico.

8.4 Interpretação Corpuscular Realista

Também chamada de Interpretação dos Ensembles Estatísticos, segundo a qual, um vetor de estado ou uma função de onda, não descreve um sistema individual apropriadamente, mas apenas um conjunto de sistemas. Provavelmente, o primeiro especialista em mecânica quântica a aceitar essa visão estatística foi John Clarke Slater. Edwin Kemble aderiu à teoria de Slater, afirmando que não podemos saber nada sobre um elétron isolado, apenas o fato de que ele pertence a um conjunto estatístico. (JAMMER, 1974).

Em um simpósio realizado na American Physical Society em Nova Iorque, no dia 31 de dezembro de 1928, Slater declarou que a mecânica ondulatória é uma extensão, não da mecânica newtoniana, mas da mecânica estatística, já que a mecânica ondulatória também trabalha com conjuntos que descrevem funções de distribuição em um espaço. (JAMMER, 1974).

O formalismo matemático da Interpretação Corpuscular Relativista, muitas vezes segue o modelo de von Neumann, sendo utilizada por Kemble e vários outros. Porém, von Neumann nunca se comprometeu com o ponto de vista defendido pela Interpretação dos ensembles estatísticos. (JAMMER, 1974).

Em comparação com a interpretação de Copenhagen, a Interpretação Corpuscular Realista teve pouquíssima aceitação, apesar dos argumentos expressos por Einstein, Popper, Slater, Kemble, entre outros. Paul Langevin, por exemplo, fez várias críticas as relações de

incerteza de Heisenberg. Porém, a teoria estatística chega à Rússia Soviética, através de Konstantin Vjatseslavovits Nikolskii, sendo vista como uma alternativa ao princípio da complementaridade de Niels Bohr. (JAMMER, 1974).

Blokhintsev defendia a Interpretação Corpuscular Realista, afirmando que a mecânica quântica moderna não é uma teoria de micro-processos, mas o estudo das propriedades, a partir da utilização de ensembles estatísticos descritos em termos clássicos da física macroscópica. A nova Mecânica quântica eliminaria a interferência do observador no fenômeno, já que a função de onda descreveria não uma partícula isolada, mas uma partícula pertencente a um determinado conjunto (JAMMER, 1974). Para a Interpretação Corpuscular Realista, os detectores simplesmente revelam as posições pré-existentes das partículas. É usual aceitar-se que as medições de posição são fidedignas: elas revelam o valor da posição possuído pela partícula antes do processo de medição. Logo após a medição, a posição da partícula permanece a mesma. É preciso admitir que a medição de posição, provoca um distúrbio incontável e imprevisível no momento da partícula. (PESSOA JR, 2003).

Heisenberg rejeitou prontamente essa teoria, afirmando que seria necessário um conhecimento a respeito da partícula, para poder afirmar que ela se encontraria em um conjunto (JAMMER, 1974).

Nos países ocidentais, naquele momento, a Interpretação Corpuscular Realista tinha poucos seguidores comprometidos. Uma das razões para este estado, sem dúvida, foi a grande autoridade que Bohr, Heisenberg, e os outros defensores importantes da interpretação de Copenhague, apresentaram ao defender sua interpretação. Para entender a segunda razão, devemos lembrar que naqueles anos von Neumann propôs a impossibilidade de se provar a existência de variáveis ocultas (JAMMER, 1974).

No entanto, existem algumas exceções. Entre elas podemos citar a adesão de Karl Popper a Interpretação Estatística, segundo o qual a mecânica quântica é aplicada apenas a problemas essencialmente estatísticos, portanto as resoluções devem ser exclusivamente estatísticas, portanto seria uma generalização da mecânica estatística clássica (JAMMER, 1974).

Paul K. Feyerabend criticou firmemente a visão de Popper e suas críticas a Bohr, afirmando que Popper estaria muito mais perto de Bohr a quem sempre ataca, do que de Einstein a quem sempre defende. A insistência de que as condições experimentais de toda a configuração física determinam a distribuição de probabilidade é, na visão de Feyerabend, precisamente o que Bohr tinha em mente quando usou a noção de "fenômeno" para incluir

todo o arranjo experimental. Mas na complementaridade vai além, tirando do sistema físico individual e atribuindo ao arranjo experimental não só probabilidade, mas também a dinâmica das variáveis do sistema, tais como posição e momento. Assim, relativiza não só probabilidade, mas todas as magnitudes dinâmicas (JAMMER, 1974).

Outros defensores da Interpretação Corpuscular Realista foram Alfred Landé, e mais recentemente Leslie Ballentine (PESSOA JR, 2003). Após publicar seu livro sobre mecânica quântica, onde não citou em nenhuma página o princípio da complementaridade, Landé retirou-se do Instituto de Copenhagen, se tornando um dos maiores opositores da Interpretação de Copenhagen. Alfred Landé não aderiu à teoria da existência de variáveis ocultas, visto que, era um opositor do determinismo, uma vez que o determinismo falharia em prever os jogos clássicos de azar e teria sido algo descartado a partir do surgimento da segunda lei da termodinâmica. Landé passa a defender a noção de causa-efeito, uma mudança de efeito necessitaria de uma mudança de causa. Se uma bola arremessada em uma rampa sempre cai a direita, para ela cair do lado esquerdo (efeito) seria necessário uma mudança nas condições iniciais de lançamento (causa). (JAMMER, 1974).

Segundo a Interpretação Corpuscular Realista, o fóton e o elétron seriam na realidade uma partícula, o que é manifestado quando o detectamos. Não existe uma onda associada, o padrão de interferência deveria ser explicado a partir da interação da partícula com o anteparo. Landé sugeriu que um anteparo cristalino daria “soquinhos” discretos na partícula, resultando no padrão de interferência com bandas discretas (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação Corpuscular Realista falha em explicar Interferometria de um único fóton. Segundo Pessoa Jr (2003) não dá para supor que o fóton segue um dos caminhos e nada vai pelo outro. Qualquer visão corpuscular tem extrema dificuldade para explicar fenômenos ondulatórios. Uma saída possível, porém, seria argumentar que a lógica ao nível quântico é tipo não-clássica. Se o conectivo fosse definido de maneira diferente, o raciocínio poderia ser invalidado.

No capítulo anterior foi mencionado o experimento de anti-correlação, o qual obrigou a Interpretação Ondulatória Realista a fazer uso da noção de colapso de onda. Esse experimento auxiliou no desenvolvimento da Interpretação Corpuscular Realista. Uma vez que poderia ser explicado facilmente pela visão corpuscular, a partícula simplesmente seguiria um dos dois caminhos possíveis, sem que ocorra qualquer divisão, colapso ou superposição.

O estado quântico é visto pela Interpretação dos Ensembles Estatísticos como uma descrição essencialmente estatística, que representa a média de todas as posições possíveis da

partícula. Entretanto, não pode ser utilizada na descrição de um objeto individual, uma vez que temos uma descrição incompleta. (PESSOA JR, 2003).

A Interpretação Corpuscular Realista vê a redução de estado a partir do experimento de Stern-Gerlach como uma grande coleção de micro-estados diferentes. A mudança de estado em nada afetaria as propriedades dos átomos. O que muda com a redução de estado seria apenas nosso conhecimento a seu respeito (PESSOA JR, 2003).

Ao contrário das demais interpretações, que aplicam o princípio da Incerteza de Heisenberg a casos individuais, a Interpretação Corpuscular Realista considera esse princípio como uma tese exclusivamente estatística, que comprova o desvio padrão de um número de medidas em um mesmo estado quântico (PESSOA JR, 2003). Alguns defensores dos ensembles estatísticos acreditam que seja possível medir simultaneamente com precisão a medida e a posição de uma partícula, desde que tenhamos um conjunto grande de partículas e um número grande de medidas.

A Interpretação Corpuscular Realista não é afetada pela inexistência do passado proposta por Wheeler, dado que assume um princípio realista de que a realidade passada e a futura possuem a mesma natureza, ou seja, que o observador não atualiza o passado. Ballentine conclui que partículas possuem valores simultâneos de posição e momento no presente e os terão no futuro, mesmo que sejamos incapazes de prever tais valores (PESSOA JR, 2003).

A visão corpuscular realista concebe o átomo como uma partícula que está sempre em um nível discreto de energia, sempre procurando provar que o observador não influencia de maneira essencial os objetos quânticos. Entretanto, não consegue explicar adequadamente a existência de batimentos quânticos (PESSOA JR, 2003).

As descobertas do spin e de suas propriedades auxiliaram no desenvolvimento de novas concepções atômicas. Uhlenbeck e Goudsmit mostraram que o spin não poderia ser pensado como surgindo da rotação de um elétron esférico em torno de seu eixo. Mesmo assim, os defensores da Interpretação Corpuscular Realista defendem que o elétron se propaga seguindo uma trajetória helicoidal (PESSOA JR, 2003).

8.5 Debate Heisenberg-Dirac

Nos tópicos anteriores foram apresentadas várias críticas á Interpretação de Copenhagen. Essas críticas originaram diversas interpretações. Porém, não podemos de maneira alguma, afirmar que os debates da época tiveram sempre como objetivo defenderem

a Interpretação de Copenhagen ou as demais interpretações. Vários debates tinham como enfoque os apoiadores da mesma interpretação, que apresentavam divergências entre si. Um desses exemplos é o famoso debate Heisenberg-Dirac.

Werner Heisenberg e Paul Adrien Maurice Dirac eram adeptos da Interpretação de Copenhagen, mesmo assim, protagonizaram um debate na Conferência de Solvay, indicando assim que até mesmo os adeptos das mesmas interpretações possuíam visões diferentes de mundo.

O debate era sobre como falar do aparecimento de fenômenos sobre os quais só podemos fazer previsões de caráter estatístico. Dirac propôs que estávamos interessados numa escolha feita pela “natureza”. Heisenberg, por outro lado, sugeriu que estávamos lidando com uma escolha do “observador” que constrói os instrumentos de medida e faz a leitura de seus registros (BOHR, 1995).

Dirac sempre foi um defensor de que a natureza era bela e escrita em lindas equações, influenciando na sua visão de que a razão está na natureza e não nas pessoas. O grande problema da visão de Dirac é que abre espaço para a inexistência do livre-arbítrio, ou seja, a presença ou não do observador não interferiria em nada no decorrer das experiências e poderíamos até afirmar que nossos atos e atitudes são inteiramente responsabilidades da natureza.

Por outro lado a visão de Heisenberg é baseada numa visão instrumentalista, de que a interação entre o observador e o instrumento cria a realidade. Portanto, o observador modifica a realidade. A realidade sobre a qual podemos falar não será nunca a realidade “em si”, mas uma realidade conhecida, ou até mesmo, em muitos casos, uma realidade configurada por nós (HEISENBERG, 2009).

Portanto, o observador é o responsável direto da construção da realidade. Entretanto, temos de recordar que o observador não é capaz de controlar todos os fatores experimentais e o risco de crescimento de uma visão solipisista, de que a realidade só existe por causa do observador em sua ausência a realidade é destruída.

Por esses motivos, nenhuma das duas proposições foi aceita pela comunidade científica. Contudo, contribuiu para o surgimento de debates epistemológicos a respeito da mecânica quântica.

Cabe a ressalva que Dirac e Heisenberg sempre tiveram uma admiração mútua um pelo outro e apenas discordavam de alguns pontos a respeito da teoria quântica. Por exemplo, Dirac sempre se recordara da viagem que fizera com Heisenberg para o Japão e sempre

afirmara que era impossível não sentir admiração por Werner, uma vez que iniciou suas pesquisas em mecânica quântica, muito jovem como ele, e que diferentemente do próprio Dirac, Heisenberg tinha conseguido sucesso em suas pesquisas. Heisenberg por outro lado, sempre destacava as contribuições de Dirac no desenvolvimento da mecânica quântica.

9 Bohr e a Interpretação Ortodoxa da Mecânica Quântica

Os materiais didáticos geralmente apresentam exclusivamente Niels Bohr como o criador de um modelo atômico, não existindo qualquer menção ao mundo quântico, e suas contribuições a química e a física atuais.

A partir do presente trabalho fica evidenciado que as contribuições de Niels Bohr para a ciência em geral são visivelmente superiores às apresentadas nos livros didáticos. Bohr não apenas criou um Instituto de Física, onde distribuiu bolsas de estudos para físicos promissores, mas, como Pinto Neto (2010) afirma, influenciou uma geração inteira de físicos e, juntamente com seus alunos e colegas, elaborou a formulação daquela que acabou se tornando a interpretação oficial da mecânica quântica.

Niels Bohr por meio de suas inúmeras palestras e debates com Albert Einstein, possibilitou que a teoria quântica deixasse de ser restrita aos físicos, mas que fosse levada a novos públicos, constituídos por filósofos, sociólogos, biólogos, fisioterapeutas, entre outros. Esses debates permitiram que o público tivesse a oportunidade de presenciar a concretização de uma teoria, desmitificando a ciência, rompendo com a visão de ciência anistórica, finita e ausente de discordâncias entre cientistas.

A Interpretação de Copenhague não reúne apenas formulações matemáticas, mas uma visão filosófica da natureza. Niels Bohr defendia a ideia de que o objetivo fundamental da ciência não era compreender a natureza tal como ela é, mas tão somente entender o que obtemos quando realizamos experimentos (PINTO NETO, 2010).

Bohr construiu a Interpretação de Copenhague mediante a influência dos positivistas do começo do século XIX. Para os defensores do positivismo, a única forma de adquirir conhecimento é a partir do método científico. A física é um discurso lógico sobre a experiência humana, nada mais do que isso. Uma vez que a realidade independente da percepção humana, jamais poderá ser testada por nós humanos já que sempre haverá a intermediação dos nossos sentidos. Essa visão é claramente utilizada por Niels Bohr em seu princípio da complementaridade (PINTO NETO, 2010).

Segundo Pessoa Jr (2003), no positivismo de Bohr os atributos onda e corpúsculo referem-se a quadros clássicos que utilizamos para representar um fenômeno experimental e não à alguma espécie de realidade. Wheeler injetou uma dose de realismo na interpretação, pois passou a considerar que onda ou corpúsculo descrevem diretamente diferentes realidades.

Para Niels Bohr, a totalidade típica dos fenômenos quânticos se manifesta na impossibilidade de uma divisibilidade ilimitada e bem definida dos acontecimentos, devido ao

fato de que, seriam necessárias alterações instrumentais, incompatíveis com os fenômenos quânticos, visto que as condições de observação interferem na realidade física, excluindo assim qualquer representação pictórica de mundo (BALSAS, 2013). Portanto, podemos afirmar que Bohr via a mecânica quântica como uma ferramenta para explicar o mundo em que vivemos. Contudo, devido à incerteza, essa ferramenta não poderia prever futuros acontecimentos ou explicar acontecimentos já ocorridos.

Bohr é um excelente exemplo de como a ciência está em contínua mudança, já que é formada por pessoas que podem modificar suas opiniões. Niels primeiramente discordou do Princípio de Incerteza de Werner Heisenberg, mas posteriormente o incluiu em sua teoria. Outro exemplo dessa evolução é destacado por Balsas (2013), pois o confronto com o artigo EPR, possibilitou a Bohr afinar a sua terminologia, fazendo-o abandonar a aplicação do conceito de complementaridade à descrição corpuscular/ondulatória para centrar-se prioritariamente na descrição cinemática/dinâmica e na mútua exclusão dos arranjos experimentais.

Foi a partir dessa exclusão mútua dos arranjos experimentais que Bohr justificou a impossibilidade de uma interpretação determinista, excluindo qualquer possibilidade de construir a Mecânica Quântica a partir de uma base ontológica. Portanto, esses debates foram sempre bem-vindos para Niels Bohr, posto que contribuíam para desenvolver a sua interpretação e se preocupava não apenas com o formalismo matemático, mas também com o desenvolvimento filosófico da Interpretação de Copenhague.

Filosoficamente, Bohr também era considerado um subjetivista, por defender o fato do observador parecer desempenhar um papel determinante sobre a realidade, nomeadamente pela liberdade de escolha do instrumento de medida a usar numa determinada experiência e, portanto, do tipo de grandezas que vão ser medidas. Entretanto, essa visão não faz justiça ao pensamento de Bohr, visto que ele não defendia a separação entre sujeito e objeto da mesma maneira que von Neumann ou Wigner, que defendiam a existência de duas leis. Na visão de Bohr as condições de observação influenciavam de modo essencial a realidade física, nunca defendendo a existência de um mundo quântico (BALSAS, 2013).

Portanto, podemos afirmar que Niels Bohr era um defensor do neopositivismo ou operacionismo, devido ao fato de que não atribuía qualquer realidade física exterior ao contexto da observação experimental e das operações realizadas para obter resultados, além de acreditar que o formalismo da Mecânica Quântica não permitia qualquer representação pictórica ou literal da realidade, sendo apenas uma representação simbólica. Os átomos

tinham uma realidade, embora fosse objeto de debate qual tipo de realidade é que Bohr acreditava que eles possuíam. Porém, vários historiadores defendem a existência de elementos realistas e anti-realistas em seu pensamento (BALSAS, 2013).

Podemos afirmar que Niels Bohr não apenas contribuiu ao explicar um modelo atômico, mas abriu as portas do conhecimento quântico para diversas áreas da sociedade. Esse conhecimento que futuramente colaborou para o desenvolvimento de inúmeras tecnologias que fazem parte do nosso cotidiano. Bohr não era apenas alguém interessado no desenvolvimento matemático de uma teoria, mas também se preocupava na formação de novos físicos, sendo um dos responsáveis pela construção de um dos maiores Institutos de Física do mundo, que possibilitou a formação de inúmeros físicos de contribuíram para a explicação do mundo quântico e por proporem aplicações da teoria quântica.

As contribuições de Niels Bohr são uma excelente oportunidade de ensino científico para alunos tanto do Ensino Médio, quanto para a graduação, uma vez que, exemplifica como a ciência é constituída por seres humanos que acertam e erram, que necessitam de auxílio de outros, que a ciência evolui juntamente com a sociedade, além de comprovar que uma teoria é considerada como verdadeira, a partir da aceitação da comunidade científica da época.

Niels Bohr não apenas contribuiu com a ciência em geral, mas também com a filosofia, visto que defendera uma visão de mundo muitas vezes baseada em uma filosofia positivista.

Considerações finais

A mecânica quântica é normalmente vista com certa mistificação por parte dos alunos da graduação e, de fato, a ciência de um modo geral é vista da mesma maneira pelos alunos do Ensino Médio, prevalecendo na maioria das vezes à visão de uma ciência anistórica, elaborada por super-gênios, sem qualquer contradição interna. O ensino de mecânica quântica é prejudicado por essa visão mistificada, além de ser dificultada pelas inúmeras interpretações e pela falta de materiais de apoio disponíveis para a utilização dos professores.

Neste contexto, Niels Bohr é considerado um dos principais, senão o principal cientista responsável pela elaboração da mecânica quântica. A realização do presente trabalho visou à elaboração de um texto historiográfico e filosófico a respeito da mecânica quântica, com enfoque especial em Niels Bohr e sua interpretação.

Por meio da revisão bibliográfica, fica evidente a necessidade de um aumento de trabalhos em português na área de ensino de mecânica quântica. Essa necessidade é ainda maior quando se trata da utilização da historiografia e da filosofia no ensino de mecânica quântica.

A utilização de história e filosofia no ensino de ciências é de extrema importância, devido ao fato de que possibilita a formação crítica do estudante, além de auxiliar na eliminação de concepções errôneas de ciência predominantes no pensamento dos estudantes. Para uma formação científica de qualidade, é necessário que o aluno conheça a sociedade em que vive, os valores morais, éticos e o desenvolvimento ao longo dos anos da área de pesquisa que pretende ingressar. Isso apenas é possível com a utilização de HFC e portanto é necessária uma maior produção de artigos e de livros didáticos que utilizem HFC no ensino de mecânica quântica.

Antes de iniciar o conteúdo de mecânica quântica, é necessário abordar os seus predecessores, uma vez que possibilita a compreensão da importância do surgimento da mecânica quântica para a ciência e para a sociedade da época, além de ser um importante exemplo de como a ciência em geral evoluiu ao decorrer dos anos.

A base teórica da Interpretação de Copenhague, é constituída pelos seis postulados de von Neumann, o Princípio da Incerteza de Werner Heisenberg e o Princípio da Complementaridade de Niels Bohr. Porém, a aceitação dessa interpretação não é unânime, uma vez que seus próprios adeptos possuíam visões filosóficas distintas do mesmo tema, além da existência de outras interpretações que proporcionaram vários debates com os defensores de Copenhague, sendo o mais importante e famoso desses o debate Bohr-Einstein.

Por meio da elaboração da Interpretação de Copenhagen e da sua defesa perante as críticas, fica evidente a importância da figura de Niels Bohr para a evolução da mecânica quântica e da ciência em geral, muito acima daquela visão restrita ao modelo atômico, que é citada nos livros didáticos do Ensino Médio.

A historiografia que defende a utilização tanto de uma visão interna quanto externa, possibilitou que o presente texto pudesse apresentar alguns fatores responsáveis pela formação da visão de mundo de Niels Bohr e os conceitos que surgiram a partir da mecânica quântica e das suas distintas interpretações. A utilização da historiografia como metodologia permite ao leitor utilizar o presente texto, visto que o mesmo foi elaborado com a utilização de referências secundárias de boa qualidade.

O texto historiográfico produzido no presente trabalho destacou as contribuições sociais, conceituais e filosóficas de Niels Bohr para a evolução da mecânica quântica e para a criação da Interpretação de Copenhagen, além de apresentar as contribuições de Werner Heisenberg, John von Neumann, e as críticas filosóficas e conceituais da Interpretação de Copenhagen.

A eficácia do presente trabalho como um texto de apoio, necessita que o mesmo seja aplicado em salas de aula tanto do Ensino Médio, quanto do Ensino Superior, para que possa ser analisado por professores e por alunos. Após essa análise, seria preciso ainda a elaboração de outros textos que abordem de maneira detalhada as demais interpretações como complemento do primeiro texto. Tal aspecto mostra-se como uma das possibilidades futuras de trabalho no interior desta temática.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, E. Teoria quântica da gravitação: cordas e teoria M. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 147-155, 2005.

ABDALLA, M. C. BOHR: O arquiteto do átomo. 2ª ed. São Paulo: Odysseus Editora, 2006. 199 p.

ABREGO, J.R.B.; et al. Montagem de um conjunto experimental destinado á verificação do princípio de incerteza de Heisenberg. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 3312-1-3312-5, 2013.

AGUIAR, M.A.M. Einstein e a teoria do caos quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 101-102, 2005.

ALCANIZ, J.S. Cosmologia: De Einstein à energia escura. **Com Ciência**, n. 90, 2007.

ALMEIDA, M.M.; GUIMARÃES, M.N.; PRUDENTE, F.V. Sobre o confinamento espacial de sistemas quânticos: O oscilador harmônico unidimensional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, p. 395-405, 2005.

ALMEIDA, W.B.; SANTOS, H.F. Modelos Teóricos para Compreensão da Estrutura da Matéria. **Química Nova na Escola**, n. 4, p. 6-13, 2011.

AMORIM, R.G.G.; et al. Funções de Wigner-80 anos e as origens da geometria não-comulativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 3604-1-3604-14, 2013.

ARAÚJO, J.C.B.; BORGES, G.R.P.; DRIGO FILHO, E. Supersimetria, método variacional e potencial de Leonard-Jones(12,6). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 41-44, 2006.

ARAÚJO, W. S.; RODRIGUES, C.G. Comparação entre as Ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 360-365, 2001.

ARENHART, J.R.B.; KRAUSE, D. Indistinguibilidade, não reflexiva, ontologia e física quântica. **ScientiaeStudia**, v.10, n. 1, p. 41-69, 2012.

BALSAS, A. **Realismo e Localidade em Mecânica Quântica**. 1º ed. Campina Grande: EDUEPB, 2013. 472 p.

BALSAS, A.; VIDEIRA, A.L.L. Truth by Fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 6, n. 2, p. 248-266, 2013.

BARBOSA, P.V.; POLITO, A.M.M.; SILVA FILHO, O.L. Espaço, Tempo e Realidade: um estudo comparativo entre 3 concepções do mundo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 571-600, 2014.

BARRETO, M. O significado de tempo: Einstein e Bergson. **Com Ciência**, n. 63, 2005.

BASTOS FILHO, J.B.; ARAÚJO, R.M.X. A entropia de Hawking para buracos negros: um exercício de análise dimensional a partir de um texto de divulgação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 527-533, 2007.

BASTOS FILHO, J.B. Pode-se progredir com base em fundamentos inconsistentes? (o caso do átomo de Bohr). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 3, p. 312-335, 2003.

BELISÁRIO, R. Buraco Negro de Pandora. **Com Ciência**, n. 156, 2014.

BERNARDINI, A.E.; LEO, S. Uma discussão sobre oscilações quirais e inversão de spin. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 507-515, 2005.

BETZ, M.E.M. Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4310-1-4310-14, 2014.

BEZERRA, V.A. *Scholaquantorum*: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. **ScientiaeStudia**, v. 4, n.1, p. 463-517, 2003.

BEZERRA, V.A. *Scholaquantorum*: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte II: crítica à leitura Lakatosiana. **ScientiaeStudia**, v. 2, n. 2, p. 207-237, 2004.

BOHR, N. **Física Atômica e conhecimento humano**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995. 140 p.

BOLÍVAR, A.O. Limite Clássico da Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 169-175, 2003.

BOLÍVAR, A.O. Teorema de Ehrenfest e o Limite Clássico da Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 2, p. 190-195, 2001.

BOSE, S. A lei de Planck e a hipótese dos quanta de luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, p. 463-465, 2005.

BUENO, O. Modalidade, abordagem semântica e mecânica quântica. **ScientiaeStudia**, v. 2, n. 1, p. 85-97, 2004.

CAMPOS, H.S. Uma abordagem sobre a irracionalidade da realidade no problema da observação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 2, p. 191-207, 2002.

CARRILLO, L. A. S.; NOGUEIRA, J. A. Força de Casimir para potenciais delta de Dirac. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 2, p. 2311-1-2311-8, 2009.

CARUSO, F.; OGURI, V. O método numérico de Numerov aplicado a equação de Schrödinger. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 2310-1-2310-7, 2014.

CASSINI, A. La invención del neutrino: un análisis epistemológico. **ScientiaeStudia**, v. 10, n. 1, p. 11-39, 2012.

CASSINI, A.; LEVINAS, L. La reinterpretación radical del experimento de Michelson-Morley por la relatividad especial. **ScientiaeStudia**, v. 3, n. 4, p. 583-596, 2005.

CASSINI, A.; LEVINAS, L.; PRINGLE, H. Einstein y la evidencia experimental a favor de la hipótesis del cuanto de luz. **ScientiaeStudia**, v. 13, n. 1, p. 73-96, 2015.

CASTELLANOS, R.; FRANCO, R.; SILVA-VALÊNCIA, J. Cálculo de la concurrencia para El modelo de Heisenberg. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 3304-1-3304-7, 2010.

CASTILHO, C.M.C. Quando e Como o Homem Começou a “Ver” os Átomos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 4, p. 364-373, 2003.

CASTRO, A.S. Potenciais delta revisitados via transformada de Fourier. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, p. 4304-1-4304-3, 2012.

CASTRO, D.L.; SILVA, T.I. Teoria atômica na concepção de alunos de turmas de 1º ano do Ensino Médio, através de avaliação da representação por desenhos. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 3, p. 97-109, 2013.

CASTRO, J.A. Por que os átomos são tão pequenos? **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, volume especial, p. 70-83, 2004.

Castro, R.S. e A.M.P. Carvalho (1992). História da Ciência: Investigando como usá-la num curso de segundo grau. **Cadernos Catarinenses de Ensino de Física**. Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 225- 237.

CAVALCANTE, M.A.; HAAG, R. Corpo Negro e a determinação experimental da constante de Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, p. 343-348, 2005.

CHAVES, L.M.M.P.; SANTOS, W.L.P.; CARNEIRO, M.H.S. História da Ciência no Estudo de Modelos Atômicos em Livros Didáticos de Química e Concepções de Ciência. **Química Nova na Escola**, v. 36, n. 4, p. 269-279, 2014.

CHIBENI, S.S. **Aspectos da descrição física da realidade**. 1º ed. Campinas: UNICAMP Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, 1997. 208 p.

CHIBENI, S.S. Certezas e Incertezas sobre as relações de Heisenberg. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 181-192, 2005.

CHIQUITO, A. J.; LANCIOTTI JUNIOR, F. Super-redes semicondutoras: Um Laboratório de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 315-322, 2004.

CHIQUITO, A.J. Pontos Quânticos: Átomos Artificiais e Transistores Atômicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.23, n.2, p.159-167, 2001.

COUTINHO, F.A.B.; NOGAMI, Y.; TOYAMA F.M. Unusual situations that arise with the Dirac delta function and its derivative. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 4, p. 4302-4302-7, 2009.

D'AMBROSIO, U. Albert Einstein e sua atuação pela paz. **Revista Brasileira de História de Matemática**, v. 5, n. 10, p. 1-17, 2005.

DARTORA, C.A.; JIMENEZ, M.J.S.; ZANELLA, F. Os fundamentos da física dos férmions de Dirac sem massa em (1+2)-D e o grafeno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 3301-1-3301-13, 2015.

DAVIDOVICH, L. Os quantas de luz e a ótica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4205-1-4205-12, 2015.

DIONÍSIO, P.H. Albert Einstein e a Física Quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 147-164, 2005.

DUARTE, H.A. Carga Nuclear Efetiva e sua consequência para a compreensão da estrutura eletrônica dos átomos. **Química Nova na Escola**, n.17, p. 22-26, 2003.

DUNCAN, A.; JANSSEN, M. **Pascual Jordan's resolution of the conundrum of the wave-particle duality of light**. 1º ed. Cambridge: Elsevier, 2008. 644 p.

EINSTEIN, A. A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 63-67, 2005.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. 1º ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2008, 248 p.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 1º ed. Rio de Janeiro: Campus, 1988, 928 p.

FANARO, M.Á.; ARLEGO, M.; OTERO, M.R. The Double slit experience with light from the point of view of Feynman's sum of multiple paths. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 2308-1-2308-7, 2014.

FELDENS, B.; DIAS, P.M.C.; SANTOS, W.M.S. E assim se fez o quantum... **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 2602-1-2602-11, 2010.

FERREIRA, A.O. Heisenberg e a doutrina das cores de Goethe e Newton. **ScientiaeStudia**, v. 13, n. 1, p. 175-206, 2015.

FERREIRA, G.F.L.; COSTA, R.C.T. Perturbação paramétrica da mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 417-420, 2006.

FERRY, A.S.; NAGEM, R.L. Analogias e contra-analogias: Um estudo sobre a viabilidade da composição entre o modelo atômico de Bohr e o sistema solar por meio de júri simulado. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 3, p. 43-60, 2009.

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. **Lições de Física de Feynman**. 1ªed. Porto Alegre: Bookman, v. 3, 2008, 416 p.

FILGUEIRAS, C.A.L. Duzentos anos da teoria atômica de Dalton. **Química Nova na Escola**, n. 20, p. 38-44, 2004.

FILGUEIRAS, C.; MORAES, F. Extensões auto-adjuntas de operadores em mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n.1, p.11-13, 2007.

FRANÇA, A.C.G; MARCONDES, M.E.R.; CARMOS, M.P. Estrutura Atômica e Formação dos Íons: Uma análise das Ideias dos alunos do 3º ano do Ensino Médio. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 4, p. 275-282, 2009.

FREIRE JUNIOR, O. Das margens para o centro: Mudanças na pesquisa em fundamentos da mecânica quântica, 1950-1990. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 369-377, 2015.

FREITAS, F.; FREIRE JUNIOR, O. A formulação dos 'estados relativos' da teoria quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 2307-1-2307-15, 2008.

FREITAS, F.; FREIRE JUNIOR, O. Para que serve uma função de onda?: Everett, Wheeler, Bohr e uma nova interpretação da teoria quântica. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 1, n. 1, p. 12-25, 2008.

GALETTI, D. Um livro de Mecânica Quântica ansiosamente esperado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 429-430, 2004.

GIARDINO, S. Angular invariant quantum mechanics in arbitrary dimension. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 3307-1-3307-7, 2013.

GOMES, H.J.P.; OLIVEIRA, O.B. Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomos. **Ciência & Cognição**, v. 12, n. 1, p. 96-109, 2007.

GONZÁLES, S.B.; ESCUDERO, C. El Modelo Atómico y las representaciones de los adolescentes. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, p. 40-50, 2015.

GRECA, I.M; HERSCOVITZ, V.E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 5, n. 1, 2005.

GRECA, I.M.; MOREIRA, M.A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 1, p. 29-56, 2001.

GURIDI, V.;ARRIASSECQ, I. Historia y filosofía de las ciencias em la educación polimodal: propuesta para su incorporación al aula. **Ciência & Educação**, v.10, n.3, p.307-316, 2004.

HEISENBERG, W. A doutrina goethiana e newtoniana das cores á luz da física moderna (Conferência proferida em 5 de maio de 1941 na Sociedade da Colaboração Cultural de Budapeste).**ScientiaeStudia**, v. 13, n. 1, p. 207-221, 2015.

HEISENBERG, W. **A ordenação da realidade**. 1º ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2009.

HEISENBERG, W. **Física e Filosofia**. 2º ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.

JAMMER, M. **The Conceptual Development of quantum mechanics**. 1º ed. President Bar-Ilan: McGraw-Hill book company, 1966, 399 p.

JAMMER, M. **The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of QM in historical perspective**. Princeton: John Wiley & Sons, 1974, 436 p.

KRAGH, H. **Introdução á Historiografia da Ciência**. Porto: Editora Porto, 2001.

KRAUS, D.; ARENHART, J.R.B. Perspectivismo na filosofia da ciência: um estudo de caso na física quântica. **ScientiaeStudia**, v. 11, n. 1, p. 159-183, 2013.

LEAL, M.C. Como a química funciona?**Química Nova na Escola**, n. 14, p. 1-12, 2001.

LEITE, P.K. Causalidade e teoria quântica. **ScientiaeStudia**, v.10, n. 1, p. 165-177, 2012.

LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da mecânica quântica. **ScientiaeStudia**, v. 8, n. 2, p. 213-241, 2010.

LEMOS, N.A. Três mitos sobre a “função” delta de Dirac. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 4, p. 4701-1-4701-3, 2010.

LOMBARDI, O.; GONZÁLES, J.C.M. Entre mecânica cuántica y estructuras químicas: a qué refierela química cuántica? **ScientiaeStudia**, v. 10, n. 4, p. 649-670, 2012.

LÜDKE, E. Medidas de elétrons livres no vácuo e estatística de Fermi-Dirac. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p. 4701-4701-5, 2011.

MAGALHÃES, G. Teoria da relatividade e a história da ciência. **Com Ciência**, n. 63, 2005.

MAIA, N.B. **O caminho para a Física Quântica**. 1º ed. São Paulo: Livraria da Física, 2009. 275 p.

MARCHIOLLI, M. A. Mecânica Quântica no Espaço de Fase: I. Formulação de Weyl-Wegner. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 4, p. 421-436, 2002.

MARQUES, D.M. **Dificuldades e Possibilidades da Utilização da História da Ciência no Ensino de Química**: Um Estudo de Caso com Professores em Formação Inicial. 2010. Tese (Pós-graduação em educação). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2010.

MARTINS, A. História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há muitas pedras nesse caminho. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007. 207 f.

MARTINS, R.A. Abordagens, métodos e historiografia da história da ciência. In: MARTINS, A.M. (ed). **O tempo e o cotidiano**. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento da Educação, p. 73-38, 1993.

MARTINS, R.A. Introdução. A história da ciência e seus usos na educação. In: SILVA, C.C. (ed). **Estudos de história e filosofia das ciências**: subsídios para a aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, p. xxi-xxxiv, 2006.

MARTINS, R.A. Ciência vs historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: ALFONSO-GOLDFAB, A.M.; BELTRAN, M.H.R. (eds). **Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. EDUC/Livraria de Física/ FAPESP, São Paulo, p. 115-145, 2015.

MARTINS, R.A. Que Tipo de História da Ciência Esperamos ter nas Próximas Décadas? **Episteme**, n. 10, p. 39-56, 2000.

MARTINS, R.A.; ROSA, P.S. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula de Einstein a De Broglie**. 1º ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014. 291 p.

MATSAS, G.E.A. Gravidade semiclássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n. 1, p. 137-145, 2005.

MATTHEWS, M. História, filosofia e Ensino de ciências: A tendência atual de reaproximação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MAZIERO, J. Entendendo a Entropia de Von Neumann. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, p. 1314-1-1314-6, 2015.

MCMURRAN, S.L.; TATTERSALL, J.J. Paul Dirac and His Beautiful Mathematics, **Revista Brasileira de História de Matemática**, n. 1, p. 163-177, 2007.

MELO, C.A.M.; PIMENTEL, B.M.; RAMIREZ, J.A. Princípio de ação quântica de Swinger. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 4, p. 4302-1-4302-16, 2013.

MELO, C.A.M.; PIMENTEL, B.M.; RAMIREZ, J.A. Teoria Algébrica de processos de medida em sistemas quânticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 3306-1-3306-13, 2011.

MELO, M.R.; LIMA NETO, E.G. Dificuldade de Ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química. **Química Nova na Escola**, v. 35, n. 2, p. 112-122, 2013.

MERÇON, F.; QUADRAT, S.V. A radioatividade e a História do tempo Presente. **Química Nova na Escola**, n. 19, p. 27-30, 2004.

MIZRAHI, S.S. Abordagem Epistemológica em um livro-texto sobre mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 309-310, 2005.

MONERAT, G.A. et al. O método de Galerkin para a quantização de sistemas Hamiltonianos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4301-1-4301-11, 2015.

MONTENEGRO, R.L.; PESSOA JUNIOR, O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.

MOREIRA, M.A.; MASSONI, N.T. Física de partículas y visiones epistemológicas contemporânea sem la formación postgraduada de profesores de física. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 1, p. 57-64, 2009.

MOURA, S.L. et al. Constante de Planck: Uma nova visão para o ensino médio. **Química Nova na Escola**, v. 33, n. 4, p. 246-251, 2011.

NASCIMENTO, M.L.F. On the “Missing Letter” to Lattes and the Nobel Prize in Physics. **Ciência e Sociedade**, v. 3, n. 2, p. 35-42, 2015.

NERY, A.L.P.; FERNANDEZ, C. Fluorescência e Estrutura Atômica: Experimento simples para abordar o tema. **Química Nova na Escola**, n. 19, p. 39-42, 2004.

NICHOL, L. **The Essential David Bohm**. 2º ed. New York: Taylor & Francis e-Library, 2005, 343 p.

NÓBREGA, M.L.; FREIRE JUNIOR, O.; PINHO, S.T.R. Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, p. 3601-1-3601-9, 2013.

NOVAES, M. Mecânica Quântica no Espaço de Fase: II. Estados Coerentes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 4, p. 437-447, 2002.

NOVELLO, M. A nova causalidade. **Com Ciência**, n. 63, 2005.

OKI, M.C.M. Paradigmas, Crises e Revoluções: A História da Química na Perspectiva Khuniana. **Química Nova na Escola**, n. 20, p. 32-37, 2004.

OKI, M.C.M.; MORADILLO, E. F. O Ensino de História da Química: Contribuindo para a compreensão da natureza da ciência. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, p. 67-88, 2008.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. P. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193-203, 2005.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea em Escolas de Nível Médio e na Formação de Professores de Física**. 1999. 433f. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Construindo Uma unidade conceitual sobre mecânica quântica: Um estudo na formação de professores de física. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

PANTOJA, G.C.F.; MOREIRA, M.A.; HERSCOVITZ, V.E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 3, p. 1-34, 2011.

PARENTE, F.A.G.; SANTOS, A.C.F.; TORT, A.C. O átomo de Bohr no Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 1502-1-1502-4, 2014.

PARENTE, F.A.G.; SANTOS, A.C.F.; TORT, A.C. Os 100 anos do átomo de Bohr. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 4, p. 4301-1-4301-8, 2013.

PAULO, I.J.C. **A aprendizagem Significativa crítica de Conceitos da Mecânica Quântica Segundo a Interpretação de Copenhagen e o Problema da Diversidade de Propostas de Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. 2006. 235 f. Tese (Doutorado) - Curso de Enseñanza de Las Ciencias, Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Burgos, Burgos, 2006. Cap. 3.

PAULO, I.J.C.; MOREIRA, M.A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 4, n. 2, p. 63-73, 2004.

PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. **Ciência & Educação**, v. 17, n. 2, p. 421-434, 2011.

PEDUZZI, L.O.Q.; BASSO, A.C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 545-557, 2005.

PEREIRA, A.P.; OSTERMANN, F. Recursos e Restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 12, n. 2, p. 9-28, 2012.

PESSOA JUNIOR, O. A representação pictórica de entidades quânticas da Química. **Química Nova na Escola**, n. 7, p. 25-33, 2007.

PESSOA JUNIOR, O. **Conceitos de Física Quântica**. 2ª edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, v. 1, 2006, 188 p.

PESSOA JUNIOR, O. Kant quântico. In: SILVA, J.C.S. P. *Filosofia e Consciência Social*. Salvador: Quarteto, p. 309- 323, 2004.

PESSOA JUNIOR, O. O que é a filosofia da física? **Com Ciência**, n. 156, 2014.

PIMENTEL, D.R.M.; CASTRO, A.S. Uma breve discussão sobre os possíveis estados ligados para uma classe de potenciais singulares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 1-8, 2014.

PINHEIRO, L.A.; COSTA, S.S.C. Relato sobre a implementação de uma unidade de aprendizagem sobre partículas elementares e interações fundamentais no Ensino Médio. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 3, p. 101-116, 2009.

PINTO NETO, N. **Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica**. 1º ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010. 140 p.

PIRES, A.S.T. **Evolução das Ideias da Física**. 2º ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011. 478 p.

PIZA, A.F.R.T. **Schrödinger & Heisenberg: A Física além do senso comum**. 1º ed. São Paulo: Odisseus, 2003. 225 p.

PLANCK, M. **Auto Biografia Científica e Outros Ensaio**s. 1º ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012. 236 p.

PLEITEZ, V. Bohr: O arquiteto do átomo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 250-255, 2003.

PRINGE, H. La filosofía trascendental y la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. **ScientiaeStudia**, v. 10, n. 1, p. 179-194, 2012.

RAMÍREZ, J. E. M.; BADILLO II, R. G.; MIRANDA, R. P. El modelo semicuántico de Bohr em los libros de texto. **Ciência & Educação**, v. 16, n. 3, p. 611-629, 2010.

RAMOS, J.M. et al. O conceito de Hibridização. **Química Nova na Escola**, n. 28, p. 24-27, 2008.

RAMOS, T.A. Introdução a mecânica dos "quanta" Parte I. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 326-342, 2003.

RAMOS, T. Introdução a mecânica dos "quanta" Parte II. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 4, p. 418-425, 2003.

RAMOS, T. Introdução a Mecânica dos "quantas" Parte III. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 71-74, 2004.

RAMOS, T. Introdução a Mecânica dos "quantas" Parte IV. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 75-78, 2004.

RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 27-36, 2005.

RIBEIRO FILHO, A. Realismo e Localidade em Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 3801-1-3801-3, 2015.

ROCHA, C.R.; HERSCOVITZ, V.E. MOREIRA, M.A. Introdução a Mecânica Quântica: uma proposta de minicurso para o ensino de conceitos e postulados fundamentais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2010.

ROZENTALSKI, E.F.; PORTO, P.A. Imagens de orbitais em livros didáticos de química geral no século XX: uma análise semiótica. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 20, n. 1, p. 181-207, 2015.

SAHELICES, C.C.; VILLÁGRA, J.A.M. Principios de mecânica cuántica em la resolución de problemas de estructuras atómicas en Estudiantes de química. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 8, n. 1, p. 11-16, 2013.

SALES, G.L. Atividade de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, p. 3501-1-3501-13, 2008.

SAMRSLA, V.E.E.; EICHLER, M.L.; PINO, J.C. A elaboração conceitual em realidade escolar da noção de vazio no modelo corpuscular da matéria. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 2, n. 1, p. 27-54, 2007.

SANTANA, A.E.; RIBEIRO FILHO, A; VIANA, J.D.M. Grupos de Lie em mecânica clássica: a Contribuição de Dirac e Recentes Desenvolvimentos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 199-209, 2000.

SILVA, C.M.S. Recepção da teoria da relatividade no Brasil entre 1919-1934. **Revista Brasileira de História de Matemática**, v. 5, n. 10, p. 57-79, 2006.

SILVA, G. S. et al. Oficina Temática: Uma proposta metodológica para o Ensino do modelo atômico de Bohr. **Ciência & Educação**, v. 20, n. 2, p. 481-495, 2014.

SILVA, L.L.; TERRAZZAN, E.A. Correspondências Estabelecidas e diferenças identificadas em atividades didáticas baseadas em analogias para o ensino de modelos atômicos. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 3, n. 2, p. 21-37, 2008.

SILVA, J.M.; LIMA, J.A.S. Quatro abordagens para o movimento browniano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 25-35, 2007.

SILVA, R.; FRANÇA, H.M. A Estabilidade do Átomo de Hidrogênio Segundo a Eletrodinâmica Estocástica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 23-29, 2002.

SILVEIRA, F.L.; PEDUZZI, L.O.Q. Três episódios de descoberta científica: Da caricatura empirista a uma outra história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, p. 26-52, 2006.

SIMON, F.O.; NOGUEIRA, R.N.; VICENTIN, F.C. Avaliação de livros de divulgação científica acerca da Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 7, n. 2, p. 40-53, 2014.

SOUZA, J.R.; COIMBRA, D. Análise da convergência na Teoria da Perturbação Estacionária. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 129-137, 2004.

SOUZA, M.F.; et al. Um breve tratado sobre aproximação paraxial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 3, p. 3308-1-3308-13, 2014.

STUDART, N. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 523-535, 2000.

SUART JUNIOR, J. B. **A Dialética do Conhecimento Científico, A prática e a Experimentação**: Uma análise do Ideário dos licenciandos e sua relação com a epistemologia da ciência moderna. 2010. 228 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2010.

TAVARES, T.F.; PRESTES, M.E.B. Pseudo-história e ensino de ciências: o caso Robert Hooke (1635-1703). **Revista da Biologia**, v. 9, n. 2, p. 35-42, 2012.

TREVISAN, R.; ANDRADE NETO, A.S. Utilização de Ferramentas Hipercurrais no Ensino de Mecânica Quântica: Investigação do Aprendizado de Representações, Drivers e Conceitos Quânticos. **Renote: Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 12, n. 12, p. 1-10, 2014.

TONIDANDEL, D.A.V.; ARAÚJO, A.E.A. A função delta revisitada: De Heaviside a Dirac. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 3306-1-3306-9, 2015.

VIDEIRA, A. A. P. Escritos. Historiografia e história da ciência. **Revista da Fundação Casa de Rui Barbosa**, Ano 1, n. 1, 2007, 284 p.

VINCENZO, S. Classical-quantum versus exact quantum results for a particle in a box. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 2701-1-2701-5, 2012.

VITERBO, V.D.; LEMES, N.H.T.; BRAGA, J.P. Variable phase equation in quantum scattering. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 1310-1-1310-5, 2014.

XAVIER JUNIOR, A.L.; CELASCHI, S. Black body radiation as a function of frequency and wavelength: an experimentally oriented approach. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 2304-1-2304-7, 2012.

WARTHA, E.J.; et. al. Uma proposta didática para elaboração do pensamento químico sobre elemento químico, átomos, moléculas e substâncias. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 7-20, 2010.

WHEELER, J.A.; ZUREK, W.H. **Quantum Theory and Measurement**. 1º ed. Princeton: Princeton University Press, 1984, 811 p.

WOLFF, J.F.S.; MORS, P.M. Relatividade no Ensino Médio: Uma experiência com motivação na história. **Experiência em Ensino de Ciências**, v. 1, n. 1, p. 14-22, 2006.

APÊNDICE

O quadro a seguir apresenta todos os artigos encontrados no levantamento bibliográfico.

n°	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
1	Ciência & Educação	O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio	Iramaia Jorge Cabral de Paulo, Marco Antonio Moreira	PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. Ciência & Educação , Bauru, v. 17, n. 2, p. 421-434, 2011.	Relação entre a linguagem clássica e a quântica.
2	Ciência & Educação	Construindo uma unidade conceitual sobre mecânica quântica: Um estudo na formação de professores de física.	Fernanda Ostermann, Trieste S.F. Ricci.	OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Construindo Uma unidade conceitual sobre mecânica quântica: Um estudo na formação de professores de física. Ciência & Educação , Bauru, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.	Implementação da disciplina de Física Moderna e contemporânea 1, para estudantes em Mestrado de Ensino de Física da UFRGS.
3	Ciência & Educação	Oficina temática: Uma proposta metodológica para o Ensino do modelo atômico de Bohr.	Giovanna Stefano Silva, et al.	SILVA, G. S.; et al. Oficina Temática: Uma proposta metodológica para o Ensino do modelo atômico de Bohr. Ciência & Educação , Bauru, v.20, n.2,p.481-495, 2014.	Relacionar o modelo atômico de Bohr com o funcionamento de uma pulseira luminosa por meio de um experimento, para facilitar a aprendizagem do Ensino Médio.
4	Ciência & Educação	Historia y filosofia de las ciencias en la educación polimodal: propuesta para su incorporación al aula.	Verónica Guridi, Irene Arriasecq	GURIDI, V.;ARRIASSECQ, I. Historia y filosofia de las ciencias en la educación polimodal: propuesta para su incorporación al aula. Ciência& Educação , Bauru, v. 10, n. 3, p. 307-316, 2004.	Modelo de aplicação de História e Filosofia da Ciência utilizando a evolução dos modelos atômicos.
5	Ciência & Educação	El modelo semicuántico de Bohr em los libros de texto.	Jorge Eliécer Moreno Ramírez, Rómulo Gallego Badillo II, Royman Pérez Miranda	RAMÍREZ, J. E. M.; BADILLO II, R. G.; MIRANDA,R. P. El modelo semicuántico de Bohr em lo slibros de texto. Ciência & Educação , Bauru, v. 16, n. 3, p. 611-629, 2010.	Comparação entre a história e epistemologia do modelo de Bohr e as apresentações do modelo nos livros didáticos.
6	Revista Brasileira de Ensino de Física	Teorema de Ehrenfest e o Limite Clássico da Mecânica Quântica	A.O Bolivar	BOLÍVAR, A.O. Teorema de Ehrenfest e o Limite Clássico da Mecânica Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 23, n. 2, p. 190-195, 2001.	Mostrar que o teorema de Ehrenfest não é adequado para conectar a mecânica quântica a clássica.
7	Revista Brasileira de Ensino de Física	Comparação entre as Ementas de um Curso de Mecânica Quântica e Física Moderna	Weslei Silva de Araújo e Clóves Gonçalves Rodrigues	ARAÚJO, W. S.; RODRIGUES, C.G. Comparação entre as Ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 23, n. 3, p. 360-365, 2001.	Comparação entre os conteúdos de Mecânica Quântica e os de Física Moderna.
8	Revista Brasileira de Ensino de Física	Mecânica Quântica no Espaço de Fase: I. Formulação de Weyl-Wigner	Marcelo A. Marchioli	MARCHIOLLI, M. A. Mecânica Quântica no Espaço de Fase: I. Formulação de Weyl-Wegner. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 24, n. 4, p. 421-436, 2002.	Apresentar o formalismo de Weyl-Wigner.
9	Revista Brasileira de Ensino de Física	Mecânica Quântica no Espaço de fase: II. Estados Coerentes	Marcel Novaes	NOVAES, M. Mecânica Quântica no Espaço de Fase: II. Estados Coerentes. Revisa Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 24, n. 4, p. 437-447, 2002.	Revisão de cálculos para estabelecer um espaço de fase e uma dinâmica Hamiltoniana para um sistema quântico.
10	Revista Brasileira de Ensino de Física	Limite Clássico da Mecânica Quântica	A.O Bolívar	BOLÍVAR, A.O. Limite Clássico da Mecânica Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 25, n. 2, p. 169-175, 2003.	Procedimento alternativo para o cálculo do limite clássico das equações de movimento da mecânica quântica.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n°	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
11	Revista Brasileira de Ensino de Física	Super- redes semicondutoras: Um laboratório de Mecânica Quântica	Adenilson J. Chiquito e Francesco Lanciotti Jr	CHIQUITO, A. J.; LANCIOTTI JÚNIOR, F., Jr. Super-redes semicondutoras: Um Laboratório de Mecânica Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 26, n. 4, p. 315-322, 2004.	Aplicação de Super-redes semicondutoras
12	Revista Brasileira de Ensino de Física	Um livro de Mecânica Quântica ansiosamente esperado.	Diógenes Galetti	GALETTI, D. Um livro de Mecânica Quântica ansiosamente esperado. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 26, n. 4, p. 429-430, 2004.	Resenha de um livro de Mecânica Quântica
13	Revista Brasileira de Ensino de Física	Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder	Fernanda Ostermann e Sandra Denise Prado	OSTERMANN, F.; PRADO, S. P. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, 2005.	Interferência Quântica no interferômetro de Mach-Zehnder, discute a existência de muitos mundos.
14	Revista Brasileira de Ensino de Física	Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto	Michel E.M. Betz	BETZ, M.E.M. Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 4, p. 4310-1-4310-14, 2014.	Interpretação da onda piloto proposta por Louis de Broglie e elaborada por David Bohm.
15	Revista Brasileira de Ensino de Física	Abordagem Epistemológica em um livro-texto sobre mecânica quântica	Salomon S. Mizrahi	MIZRAHI, S.S. Abordagem Epistemológica em um livro-texto sobre mecânica quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 2, p. 309-310, 2005.	Resenha do livro Conceitos de Física Quântica de Osvaldo Pessoa Jr.
16	Revista Brasileira de Ensino de Física	Perturbação paramétrica da mecânica quântica	G.F. Leal Ferreira e Rogério C.T da Costa	FERREIRA, G.F.L.; COSTA, R.C.T. Perturbação paramétrica da mecânica quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 28, n. 4, p. 417-420, 2006.	Perturbação da mecânica quântica em função do tempo.
17	Revista Brasileira de Ensino de Física	Extensões auto-adjuntas de operadores em mecânica quântica	C. Figueiras e Fernando Moraes	FIGUEIRAS, C.; MORAES, F. Extensões auto-adjuntas de operadores em mecânica quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 29, n. 1, p. 11-13, 2007.	Estudo de operadores;” matemática da física”.
18	Revista Brasileira de Ensino de Física	Realismo e Localidade em Mecânica Quântica	Aurino Ribeiro Filho	RIBEIRO FILHO, A. Realismo e Localidade em Mecânica Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 3, p. 3801-1-3801-3, 2015.	Resenha do livro de Álvaro Balsas
19	Revista Brasileira de Ensino de Física	Princípio de ação quântica de Schwinger	C.A.M. de Melo, B.M. Pimentel, J.A. Ramirez	MELO, C.A.M.; PIMENTEL, B.M.; RAMIREZ, J.A. Princípio de ação quântica de Sewinger. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 4, p. 4302-1-4302-16, 2013.	Resolução de Sistema simples utilizando a ação quântica de Schwinger
20	Revista Brasileira de Ensino de Física	Os 100 anos do átomo de Bohr	F.A.G Parente, A.C.F dos Santos, A.C. Tort	PARENTE, F.A.G.; SANTOS, A.C.F.; TORT, A.C. Os 100 anos do átomo de Bohr. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 4, p. 4301-1-4301-8, 2013.	Revisar o modelo atômico de Bohr.

	Física				
21	Revista Brasileira de Ensino de Física	Entendendo a Entropia de Von Neumann	Jonas Maziero	MAZIERO, J. Entendendo a Entropia de Von Neumann. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 1, p. 1314-1-1314-6, 2015.	Revisão de postulados da mecânica quântica que ajudem a explicar a Entropia de Von Neumann
22	Revista Brasileira de Ensino de Física	O método numérico de Numerov aplicado a equação de Schrödinger	Francisco Caruso e Vitor Oguri	CARUSO, F.; OGURI, V. O método numérico de Numerov aplicado a equação de Schrödinger. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 2, p. 2310-1-2310-7, 2014.	Apresentação do Método de Numerov e resolução de problemas da mecânica quântica utilizando esse mesmo método.
23	Revista Brasileira de Ensino de Física	O átomo de Bohr no Ensino Médio	F.A.G Parente, A.C.F dos Santos, A.C. Tort	PARENTE, F.A.G.; SANTOS, A.C.F.; TORT, A.C. O átomo de Boh no Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1502-1-1502-4, 2014.	Introdução do Modelo atômico de Bohr no Ensino de Física do Ensino Médio por meio de analogias.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n.º	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
24	Revista Brasileira de Ensino de Física	Teoria Algébrica de processos de medida em sistemas quânticos	C.A.M. de Melo, B.M. Pimentel, J.A. Ramirez	MELO, C.A.M.; PIMENTEL, B.M.; RAMIREZ, J.A. Teoria Algébrica de processos de medida em sistemas quânticos. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 33, n. 2, p. 3306-1-3306-13, 2011.	Símbolo de medida de Schwinger.
25	Revista Brasileira de Ensino de Física	The Double slit experience with light from the point of view of Fyeman's sum of multiple paths	María de Los Angeles Fanaro, Marcelo Arlego, María Rita Otero	FANARO, M.Á.; ARLEGO, M.; OTERO, M.R. The Double slit experience with light from the point of view of Fyeman's sum of multiple paths. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 2, p. 2308-1-2308-7, 2014.	Análise da experiência de fenda dupla com luz.
26	Revista Brasileira de Ensino de Física	Unusual situations that arise with the Dirac delta function and its derivative	COUTINHO, F.A.B.; NOGAMI, Y.; TOYAMA F.M.	COUTINHO, F.A.B.; NOGAMI, Y.; TOYAMA F.M. Unusual situations that arise with the Dirac delta function and its derivative. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 31, n. 4, p. 4302-4302-8, 2009.	Apresenta situações onde um função combinada com a função de Dirac deixa de ser válida.
27	Revista Brasileira de Ensino de Física	Teoria quântica da gravitação: cordas e teoria M.	Elcio Abdalla	ABDALLA, E. Teoria quântica da gravitação: cordas e teoria M. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 1, p. 147-155, 2005.	Junção da Mecânica Quântica e da relatividade geral, consequência de seu início e evolução.
28	Revista Brasileira de Ensino de Física	Gravidade semiclássica	George E. A Matsas	MATSAS, G.E.A. Gravidade semiclássica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 1, p. 137-145, 2005.	Descrição da Teoria semiclássica da gravitação.
29	Revista Brasileira de Ensino de Física	Supersimetria, método variacional e potencial de Lennard-Jones (12,6)	João Cesar Boreggio de Araujo, Gláucia R.P. Borges, Elso Drigo Filho	ARAUJO, J.C.B.; BORGES, G.R.P.; DRIGO FILHO, E. Supersimetria, método variacional e potencial de Leonard-Jones(12,6). Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 26, n. 1, p. 41-44, 2006.	Revisão sobre o uso do formalismo da supersimetria.
30	Revista Brasileira de Ensino de Física	Funções de Wigner-80 anos e as origens da geometria não-comulativa	R.G.G. Amorim; M.C.B. Fernandes; A.R. Queiroz; A.E. Santana; J.D.M. Viana.	AMORIM, R.G.G.; et al. Funções de Wigner-80 anos e as origens da geometria não-comulativa. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 3, p. 3604-1-3604-14, 2013.	Revisão pedagógica sobre teorias físicas em espaços não-comulativos.
31	Revista Brasileira de Ensino de Física	Pontos Quânticos: Átomos Artificiais e Transistores Atômicos.	Adenilson J. Chiquito	CHIQUITO, A.J. Pontos Quânticos: Átomos Artificiais e Transistores Atômicos. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 23, n. 2, p. 159-167, 2001.	Discutir conceitos relacionados ao confinamento de elétrons.
32	Revista Brasileira de Ensino de Física	Bohr: O arquiteto do átomo.	V. Pleitez	PLEITEZ, V. Bohr: O arquiteto do átomo. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 25, n. 2, p. 250-25, 2003.	Resenha de livro.
33	Revista Brasileira de Ensino de Física	Quando e Como o Homem Começou a "Ver" os Átomos.	Caio Mário Castro de Castilho	CASTILHO, C.M.C. Quando e Como o Homem Começou a "Ver" os Átomos. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v.25, n. 4, p. 364-373, 2003.	Microscópio Iônico de Campo de Erwin Müller.
34	Revista Brasileira de Ensino de Física	Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio	Luiz O. Q. Peduzzi e Andreza C. Basso	PEDUZZI, L.O.Q.; BASSO, A.C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 4, p. 545-557, 2005.	Análise de textos sobre o modelo atômico de Bohr em livros didáticos de Física, com base nos estudos de Lakatos.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n ^o	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
35	Revista Brasileira de Ensino de Física	A Estabilidade do Átomo de Hidrogênio Segundo a Eletrodinâmica Estocástica	Roberto da Silva e Humberto M. França.	SILVA, R.; FRANÇA, H.M. A Estabilidade do Átomo de Hidrogênio Segundo a Eletrodinâmica Estocástica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 24, n. 1, p. 23-29, 2002.	Importância de radiação de ponto zero para a estabilidade do átomo.
36	Revista Brasileira de Ensino de Física	Sobre o confinamento espacial de sistemas quânticos: O oscilador harmônico unidimensional	Marcos M. Almeida; Marcílio N. Guimarães; Frederico V. Prudente	ALMEIDA, M.M.; GUIMARÃES, M.N.; PRUDENTE, F.V. Sobre o confinamento espacial de sistemas quânticos: O oscilador harmônico unidimensional. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 3, p. 395-405, 2005.	Apresentar 2 sistemas quânticos confinados.
37	Revista Brasileira de Ensino de Física	Uma breve discussão sobre os possíveis estados ligados para uma classe de potenciais singulares	Douglas R.M. Pimentel; Antônio S. de Castro	PIMENTEL, D.R.M.; CASTRO, A.S. Uma breve discussão sobre os possíveis estados ligados para uma classe de potenciais singulares. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1-8, 2014.	Investigar a equação de Schrodinger com uma classe de potenciais.
38	Revista Brasileira de Ensino de Física	Análise da convergência na Teoria da Perturbação Estacionária	J. Ricardo de Souza; Débora Coimbra	SOUZA, J.R.; COIMBRA, D. Análise da convergência na Teoria da Perturbação Estacionária. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v.26, n. 2, p. 129-137, 2004.	Revisão da teoria de perturbação da mecânica quântica.
39	Revista Brasileira de Ensino de Física	Certezas e Incertezas sobre as relações de Heisenberg	Silvio Seno Chibeni	CHIBENI, S.S. Certezas e Incertezas sobre as relações de Heisenberg. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 2, p. 181-192, 2005.	Discutir conceitualmente as relações de Heisenberg.
40	Revista Brasileira de Ensino de Física	Einstein e a teoria do caos quântico	M.A.M. de Aguiar	AGUIAR, M.A.M. Einstein e a teoria do caos quântico. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 1, p. 101-102, 2005.	Breve histórico da teoria do caos quântico de Einstein
41	Revista Brasileira de Ensino de Física	Classical-quantum versus exact quantum results for a particle in a box	Salvatore de Vincenzo	VINCENZO, S. Classical-quantum versus exact quantum results for a particle in a box. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 34, n. 2, p. 2701-1-2701-5, 2012.	Comparação entre resultados clássicos-quânticos e a moderna mecânica quântica.
42	Revista Brasileira de Ensino de Física	Montagem de um conjunto experimental destinado à verificação do princípio de incerteza de Heisenberg	José Ramon Beltran Abrego; et al.	ABREGO, J.R.B.; et al. Montagem de um conjunto experimental destinado à verificação do princípio de incerteza de Heisenberg. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 3, p. 3312-1-3312-5, 2013.	Aplicação do princípio da incerteza de Heisenberg por meio da experimentação utilizando difração.
43	Revista Brasileira de Ensino de Física	Cálculo de la concurrencia para El modelo de Heisenberg	R. Castellanos; R. Franco; J. Silva-Valência.	CASTELLANOS, R.; FRANCO, R.; SILVA-VALÊNCIA, J. Cálculo de la concurrencia para El modelo de Heisenberg. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 32, n. 3, p. 3304-1-3304-7, 2010.	Cálculo baseado no modelo de Heisenberg
44	Revista Brasileira de Ensino de Física	Três mitos sobre a “função” delta de Dirac	Nivaldo A. Lemos	LEMOS, N.A. Três mitos sobre a “função” delta de Dirac. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 32, n. 4, p. 4701-1-4701-3, 2010.	Apresenta concepções matemáticas errôneas de livros-textos sobre a “função” delta de Dirac.

	Física				
4 5	Revista Brasileira de Ensino de Física	Força de Casimir para potenciais delta de Dirac	Luis Alberto Soriano Carrillo e José Alexandre Nogueira	CARRILLO, L. A. S.; NOGUEIRA, J. A. Força de Casimir para potenciais delta de Dirac. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 31, n. 2, p. 2311-1-2311-8, 2009.	Determinar funções de Green para os cálculos das funções de Casimir.
4 6	Revista Brasileira de Ensino de Física	Medidas de elétrons livres no vácuo e estatística de Fermi-Dirac.	Everton Lüdke	LÜDKE, E. Medidas de elétrons livres no vácuo e estatística de Fermi-Dirac. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 33, n. 4, p. 4701-4701-5, 2011.	Aplicação de experimentos de baixo custo para comprovar conceitos da estatística quântica.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n. o	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
4 7	Revista Brasileira de Ensino de Física	A função delta revisitada: De Heaviside a Dirac	D.A.V. Tonidandel; A.E.A. Araújo.	TONIDANDEL, D.A.V.; ARAÚJO, A.E.A. A função delta revisitada: De Heaviside a Dirac. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 3, p. 3306-1-3306-9, 2015.	Mostrar o desenvolvimento da função delta ao decorrer dos tempos.
4 8	Revista Brasileira de Ensino de Física	Potenciais delta revisitados via transformada de Fourier	A.S. de Castro	CASTRO, A.S. Potenciais delta revisitados via transformada de Fourier. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 34, n. 4, p. 4304-1-4304-3	Matemático.
4 9	Revista Brasileira de Ensino de Física	Grupos de Lie em mecânica clássica: a Contribuição de Dirac e Recentes Desenvolvimentos	A.E. Santana; A. Ribeiro Filho; J. David. M. Viana.	SANTANA, A.E.; RIBEIR FILHO, A; VIANA, J.D.M. Grupos de Lie em mecânica clássica: a Contribuição de Dirac e Recentes Desenvolvimentos. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 22, n. 2, p. 199-2009, 2000.	Reexamina os grupos de Lie através das novas descobertas.
5 0	Revista Brasileira de Ensino de Física	Os fundamentos da física dos férmions de Dirac sem massa em (1+2)-D e o grafeno.	C.A. Dartora; Miguel J. Saldanha Jimenez; Fernando Zanella.	DARTORA, C.A.; JIMENEZ, M.J.S.; ZANELLA, F. Os fundamentos da física dos férmions de Dirac sem massa em (1+2)-D e o grafeno. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 3, p. 3301-1-3301-13, 2015.	Apresentar a física dos férmions de Dirac.
5 1	Revista Brasileira de Ensino de Física	Uma discussão sobre oscilações quirais e inversão de spin.	Alex Eduardo de Bernardini; Stefano De Leo.	BERNARDINI, A.E.; LEO, S. Uma discussão sobre oscilações quirais e inversão de spin. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 4, p. 507-515, 2005.	Estudo sobre oscilação química.
5 2	Revista Brasileira de Ensino de Física	A formulação dos 'estados relativos' da teoria quântica	Fábio Freitas; Olival Freire Jr.	FREITAS, F.; FREIRE JUNIOR, O. A formulação dos 'estados relativos' da teoria quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 30, n. 2, p. 2307-1-2307-15, 2008.	Apresentação dos estados relativos publicados por Hugh Everett em 1957.

53	Revista Brasileira de Ensino de Física	Angular invariant quantum mechanics in arbitrary dimension	Sergio Giardino	GIARDINO, S. Angular invariant quantum mechanics in arbitrary dimension. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 3, p. 3307-1-3307-7, 2013.	Problema do poço de potencial infinito.
54	Revista Brasileira de Ensino de Física	Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica	M.L. Nóbrega; O. Freire Jr.; S.T.R. Pinho	NÓBREGA, M.L.; FREIRE JUNIOR, O; PINHO, S.T.R. Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 35, n. 2, p. 3601-1-3601-9, 2013.	Contribuições de Planck para termodinâmica.
55	Revista Brasileira de Ensino de Física	A lei de Planck e a hipótese dos quanta de luz	Satyandranath Bose	BOSE, S. A lei de Planck e a hipótese dos quanta de luz. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 3, p. 463-465, 2005.	Tradução de artigo de Bose de 1924.
56	Revista Brasileira de Ensino de Física	Corpo Negro e a determinação experimental da constante de Planck	Marisa Almeida Cavalcante; Rafael Haag	CAVALCANTE, M.A.; HAAG, R. Corpo Negro e a determinação experimental da constante de Planck. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 3, p. 343-348, 2005.	Experimentação de física, determinar a constante de Planck com auxílio de dois diodos de emissão de luz.
57	Revista Brasileira de Ensino de Física	A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico	Einstein, A.	EINSTEIN, A. A teoria da radiação de Planck e a teoria do calor específico. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 1, p. 63-67, 2005.	Tradução de artigo de Einstein.
58	Revista Brasileira de Ensino de Física	A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck	Nelson Studart	STUDART, N. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 22, n. 4, p. 523-535, 2000.	Discutir as origens da teoria quântica.
59	Revista Brasileira de Ensino de Física	Os quanta de luz e a ótica quântica	Luiz Davidovich	DAVIDOVICH, L. Os quantas de luz e a ótica quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 4, p. 4205-1-4205-12, 2015.	Apresenta a teoria da luz de Planck até emaranhamento de fótons.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

nº	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
60	Revista Brasileira de Ensino de Física	Black body radiation as a function of frequency and wavelength: an experimentally oriented approach	Xavier, Jr. Ademir L.; Sérgio Celaschi.	XAVIER JUNIOR, A.L.; CELASCHI, S. Black body radiation as a function of frequency and wavelength: an experimentally oriented approach. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 34, n. 2, p. 2304-1-2304-7, 2012.	Como ensinar o espectro de distribuição de Planck.
61	Revista Brasileira de Ensino de Física	E assim se fez o quantum...	Bruno Feldens; Penha Maria Cardoso Dias; Wilma Machado Soares Santos.	FELDENS, B.; DIAS, P.M.C.; SANTOS, W.M.S. E assim se fez o quantum... Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 32, n. 2, p. 2602-1-2602-11, 2010.	História do nascimento do conceito quantum.
62	Revista Brasileira de Ensino de Física	Atividade de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem	Gilvandenys Leite Sales, et.al.	SALES, G.L. Atividade de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 37, n. 4, p. 4205-1-4205-12, 2015.	Utilização de um recurso didático.

	Física	pato quântico.		Física, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 3501-1-3501-13, 2008.	
6 3	Revista Brasileira de Ensino de Física	A entropia de Hawking para buracos negros: um exercício de análise dimensional a partir de um texto de divulgação.	Jenner Barreto Bastos Filho; Roberto Moreira Xavier de Araújo.	BASTOS FILHO, J.B; ARAÚJO, R.M.X. A entropia de Hawking para buracos negros: um exercício de análise dimensional a partir de um texto de divulgação. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 29, n. 4, p. 527-533, 2007.	Escrever a fórmula de Entropia de Hawking através de uma análise dimensional de um texto de Hawking.
6 4	Revista Brasileira de Ensino de Física	A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial.	Jürgen Renn.	RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 27, n. 1, p. 27-36, 2005.	Tradução de um artigo de Jürgen Renn que faz uma historiografia sobre Einstein.
6 5	Revista Brasileira de Ensino de Física	Quatro abordagens para o movimento browniano.	J.M. Silva; J.A.S. Lima	SILVA, J.M.; LIMA, J.A.S. Quatro abordagens para o movimento browniano. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 29, n. 1, p. 25-35, 2007.	Explicar as diferentes interpretações do movimento browniano ao longo da história.
6 6	Revista Brasileira de Ensino de Física	Introdução a mecânica dos "quanta" Parte I	Theodoro A. Ramos	RAMOS, T.A. Introdução a mecânica dos "quanta" Parte I. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 25, n. 3, p. 326-342, 2003.	Republicação de um artigo de 1931 sobre o surgimento da mecânica quântica.
6 7	Revista Brasileira de Ensino de Física	Introdução a mecânica dos "quanta" Parte II.	Theodoro Ramos	RAMOS, T. Introdução a mecânica dos "quanta" Parte II. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 25, n. 4, p. 418-425, 2003.	Republicação de um artigo de 1931 que debate a equação de Schrödinger e a função de onda de acordo com Bohr.
6 8	Revista Brasileira de Ensino de Física	Um breve tratado sobre aproximação paraxial.	Moisés Fernandes de Souza, et.al	SOUZA, M.F.; et al. Um breve tratado sobre aproximação paraxial. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 3, p. 3308-1-3308-13, 2014.	Revisão da equação paraxial para física e engenharia.
6 9	Revista Brasileira de Ensino de Física	O método de Galerkin para a quantização de sistemas Hamiltonianos.	G.A. Monerat, et al.	MONERAT, G.A.; et al. O método de Galerkin para a quantização de sistemas Hamiltonianos. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo v. 37, n. 4, p. 4301-1-4301-11, 2015.	Método de Galerkin.
7	Revista Brasileira de Ensino de Física	Variable phase equation in quantum scattering	Vitor D. Viterbo, Nelson H.T. Lemes, João P. Braga.	VITERBO, V.D.; LEMES, N.H.T.; BRAGA, J.P. Variable phase equation in quantum scattering. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1310-1-1310-5, 2014.	Uma modificação da equação Schrödinger para uma equação diferencial de primeira ordem

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n.º	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
7 1	Investigação em Ensino de Ciências	Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória	Ileana Maria Greca; Marco Antônio Moreira.	GRECA, I.M.; MOREIRA, M.A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. Investigação em Ensino de Ciências , Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 29-56, 2001.	Revisão de literatura.
7	Investigação	Interpretações da teoria quântica e as	Roberto Luiz	MONTENEGRO, R.L.; PESSOAJUNIOR, O. Interpretações da	Aplicação de questionários sobre mecânica quântica em

2	em Ensino de Ciências	concepções dos alunos do curso de física.	Montenegro; Osvaldo Pessoa Jr.	teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. Investigação em Ensino de Ciências , Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.	alunos de física.
7 3	Investigação em Ensino de Ciências	Imagens de orbitais em livros didáticos de química geral no século XX: uma análise semiótica.	Evandro Rozentaliski; Fortes Paulo Alves Porto	ROZENTALSKI, E.F.; PORTO, P.A. Imagens de orbitais em livros didáticos de química geral no século XX: uma análise semiótica. Investigação em Ensino de Ciências , Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 181-207, 2015.	Análise de livros didáticos.
7 4	Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio.	Iramia Jorge Cabral de Paulo; Marco Antônio Moreira	PAULO, I.J.C.; MOREIRA, M.A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências , v. 4, n. 2, p. 63-73, 2004.	Ensino de Mecânica Quântica.
7 5	Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	Superposição linear em ensino de mecânica quântica.	Ileana M. Greca; Victoria E. Herscovitz.	GRECA, I.M; HERSCOVITZ, V.E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências , v. 5, n. 1, 2005.	Ensino de Mecânica Quântica na graduação de Engenharia.
7 6	Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	Recursos e Restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica.	Alexsandro Pereira de Pereira; Fernanda Ostermann	PEREIRA, A.P.; OSTERMANN, F. Recursos e Restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências , v. 12, n. 2, p. 9-28, 2012.	Papel da mediação no ensino de ciências.
7 7	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Uma abordagem sobre a irracionalidade da realidade no problema da observação	Hélio Silva Campos	CAMPOS, H.S. Uma abordagem sobre a irracionalidade da realidade no problema da observação. Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 19, n. 2, p. 191-207, 2002.	Destaca o conceito realidade, enfatizando o aspecto ontológico.
7 8	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Das margens para o centro: Mudanças na pesquisa em fundamentos da mecânica quântica, 1950-1990.	Olival Freire Jr.	FREIRE JUNIOR, O. Das margens para o centro: Mudanças na pesquisa em fundamentos da mecânica quântica, 1950-1990. Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 369-377, 2015.	História da física quântica mostracom a teoria quântica valorizou-se.
7 9	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Espaço, Tempo e Realidade: um estudo comparativo entre 3 concepções do mundo.	Patrícia Valero Barbosa; Antony Marco Mota Polito; Olavo Leopoldino da Silva Filho	BARBOSA, P.V.; POLITO, A.M.M.; SILVA FILHO, O.L. Espaço, Tempo e Realidade: um estudo comparativo entre 3 concepções do mundo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 31, n. 3, p. 571-600, 2014.	Filosofia da física.
7 8 0	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Pode-se progredir com base em fundamentos inconsistentes? (o caso do átomo de Bohr).	Jenner Barreto Bastos Filho	BASTOS FILHO, J.B. Pode-se progredir com base em fundamentos inconsistentes? (o caso do átomo de Bohr). Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 20, n. 3, p. 312-335, 2003.	Análise da teoria atômica de Bohr, sobre o ponto de vista da lógica e da dialética.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n ^o	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
81	Revista Brasileira de Ensino de Física	Introdução a Mecânica dos “quanta” Parte III.	Theodoro Ramos	RAMOS, T. Introdução a Mecânica dos “quanta” Parte III. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 26, n. 1, p. 71-74, 2004.	Discutir a transição da Mecânica clássica para a mecânica quântica.
82	Revista Brasileira de Ensino de Física	Introdução a Mecânica dos “quanta” Parte IV.	Theodoro Ramos	RAMOS, T. Introdução a Mecânica dos “quanta” Parte IV. Revista Brasileira de Ensino de Física , São Paulo, v. 26, n. 1, p. 75-78, 2004.	Introduz a mecânica matricial de Heisenberg.
83	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Albert Einstein e a Física Quântica	Paulo Henrique Dionísio	DIONÍSIO, P.H. Albert Einstein e a Física Quântica. Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 22, n. 2, p. 147-164, 2005.	Discutir o artigo “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, de autoria de Einstein.
84	Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Três episódios de descoberta científica: Da caricatura empirista a uma outra história.	Fernando Lang da Silveira; Luiz O.Q. Peduzzi.	SILVEIRA, F.L.; PEDUZZI, L.O.Q. Três episódios de descoberta científica: Da caricatura empirista a uma outra história. Caderno Brasileiro de Ensino de Física , Florianópolis, v. 23, n. 1, p. 26-52, 2006.	História da ciência, analisa o papel da experimentação na física de Galileu, na teoria da relatividade restrita e no modelo atômico de Bohr.
85	Química Nova na Escola	A representação pictórica de entidades quânticas da Química	Osvaldo Pessoa Jr.	PESSOA JUNIOR, O. A representação pictórica de entidades quânticas da Química. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 7, p. 25-33, 2007.	Apresenta as representações em livros de química e salienta as diferentes interpretações da mecânica quântica.
86	Química Nova na Escola	O conceito de Hibridização	Joanna Maria Ramos; et al.	RAMOS, J.M.; et al. O conceito de Hibridização. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 28, p. 24-27, 2008.	Analisa a abordagem dos orbitais atômicos em livros do ensino superior.
87	Química Nova na Escola	Constante de Planck: Uma nova visão para o ensino médio	Sílio Lima de Moura, et. al.	MOURA, S.L.; et al. Constante de Planck: Uma nova visão para o ensino médio. Química Nova na Escola , São Paulo, v. 33, n. 4, p. 246-251, 2011.	Proposta de Ensino para o Ensino Médio.
88	Química Nova na Escola	Modelos Teóricos para Compreensão da Estrutura da Matéria	Wagner B. de Almeida; Hélio F. dos Santos.	ALMEIDA, W.B.; SANTOS, H.F. Modelos Teóricos para Compreensão da Estrutura da Matéria. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 4, p. 6-13, 2011.	Formalismo da química quântica
89	Química Nova na Escola	Fluorescência e Estrutura Atômica: Experimento simples para abordar o tema.	Ana Luisa Petillo Nery; Carmen Fernandez	NERY, A.L.P.; FERNANDEZ, C. Fluorescência e Estrutura Atômica: Experimento simples para abordar o tema. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 19, p. 39-42, 2004.	Proposta de experimentação
90	Química Nova na Escola	História da Ciência no Estudo de Modelos Atômicos em Livros Didáticos de Química e Concepções de Ciência	Ligia M. Martinho Pereira Chaves; Wildson Luiz Pereira	CHAVES, L.M.M.P.; SANTOS, W.L.P.; CARNEIRO, M.H.S. História da Ciência no Estudo de Modelos Atômicos em Livros Didáticos de Química e Concepções de Ciência. Química Nova na	Análise das concepções de ciências reveladas nos conteúdos de modelos atômicos de 6 livros didáticos de química do Ensino Médio.

			dos Santos; Maria Helena da Silva Carneiro	Escola , São Paulo, v. 36, n. 4, p. 269-279, 2014.	
9 1	Química Nova na Escola	A radioatividade e a História do tempo Presente.	Fábio Merçon; Samantha Viz Quadrat	MERÇON, F.; QUADRAT, S.V. A radioatividade e a História do tempo Presente. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 19, p. 27-30, 2004.	História da radioatividade
9 2	Química Nova na Escola	Duzentos anos da teoria atômica de Dalton	Carlos Alberto L. Figueiras	FIGUEIRAS, C.A.L. Duzentos anos da teoria atômica de Dalton. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 20, p. 38-44, 2004	Resenha dos aspectos filosóficos que precederam a proposta daltoniana.
9 3	Química Nova na Escola	Paradigmas, Crises e Revoluções: A História da Química na Perspectiva Khuniana.	Maria da Conceição MarinhoOki	OKI, M.C.M. Paradigmas, Crises e Revoluções: A História da Química na Perspectiva Khuniana. Química Nova na Escola , São Paulo, n.20, p. 32-37, 2004.	Analisar a revolução química de Lavoisier e a filosofia química de Dalton sobre uma perspectiva Khuniana.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n.º	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
9 4	RENOTE: Revista Novas Tecnologias na Educação	A Utilização de Ferramentas Hiperulturais no Ensino de Mecânica Quântica: Investigação do Aprendizado de Representações, Drivers e Conceitos Quânticos	Robson Trevisan; Agostinho Serrano de Andrade Neto	TREVISAN, R.; ANDRADE, A.S., Neto. A Utilização de Ferramentas Hiperulturais no Ensino de Mecânica Quântica: Investigação do Aprendizado de Representações, Drivers e Conceitos Quânticos. Renote: Revista Novas Tecnologias na Educação , v. 12, n. 12, p. 1-10, 2014	Utilização de computadores na mediação de conhecimentos de mecânica quântica.
9 5	Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia	Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009	Glauco Cohen Ferreira Pantoja; Marco Antônio Moreira; Victoria Elnecave Herscovitz.	PANTOJA, G.C.F.; MOREIRA, M.A.; HERSCOVITZ, V.E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia , Curitiba, v. 4, n. 3, p. 1-34, 2011.	Revisão da literatura em Ensino de Mecânica Quântica.
9 6	Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia	Avaliação de livros de divulgação científica acerca da Mecânica Quântica	Fernanda Oliveira Simon; Renata Nascimento Nogueira; Flávio César Vicentin.	SIMON, F.O.; NOGUEIRA, R.N.; VICENTIN, F.C. Avaliação de livros de divulgação científica acerca da Mecânica Quântica. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia , Curitiba, v. 7, n. 2, p. 40-53, 2014.	Analisar os livros de mecânica quântica do ensino superior.
9 7	Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia	Introdução a Mecânica Quântica: uma proposta de minicurso para o ensino de conceitos e postulados fundamentais.	Carlos Raphael Rocha; Victória Elnecave Herscovitz; Marco Antônio Moreira.	ROCHA, C.R.; HERSCOVITZ, V.E. MOREIRA, M.A. Introdução a Mecânica Quântica: uma proposta de minicurso para o ensino de conceitos e postulados fundamentais. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia , Curitiba, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2010.	Proposta pedagógica para o ensino de mecânica quântica.
9 8	Revista Brasileira de História de Matemática	Recepção da teoria da relatividade no Brasil entre 1919-1934.	Circe Mary Silva da Silva.	SILVA, C.M.S. Recepção da teoria da relatividade no Brasil entre 1919-1934. Revista Brasileira de História de Matemática , v. 5, n. 10, p. 57-79, 2006.	Apresentar as recepções da teoria de Einstein no Brasil.
9 9	Revista Brasileira de	Paul Dirac and His Beautiful	Shawnee L. McMurrin; James J. Tattersall	MCMURRAN, S.L.; TATTERSALL, J.J. Paul Dirac and His Beautiful Mathematics, Revista Brasileira de História de	Apresenta a obra de Paul Dirac.

	História de Matemática	Mathematics		Matemática , n. 1, p. 163-177, 2007.	
100	Revista Brasileira de História de Matemática	Albert Einstein e sua atuação pela paz.	Ubiratan D'Ambrosio	D'AMBROSIO, U. Albert Einstein e sua atuação pela paz. Revista Brasileira de História de Matemática , v.5, n. 10, p. 1-17, 2005.	Comentar sobre o centenário de AmmusMirablis, 60 anos do lançamento das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, os cinquenta anos de criação do Movimento Pugwash.
100	Química Nova na Escola	Como a química Funciona?	Murilo Cruz Leal	LEAL, M.C. Como a química funciona?. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 14, p. 1-12, 2001.	Abordagem epistemológica sobre o ensino de química geral.
102	Química Nova na Escola	Dificuldade de Ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química	Marlene Rios Melo; Edmilson Gomes de Lima Neto	MELO, M.R.; LIMA NETO, E.G. Dificuldade de Ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química. Química Nova na Escola , São Paulo, v. 35, n. 2, p. 112-122, 2013.	Aplicação de textos e experimentos para o ensino médio.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n.º	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
103	Química Nova na Escola	Carga Nuclear Efetiva e sua consequência para a compreensão da estrutura eletrônica dos átomos.	Hélio Anderson Duarte	DUARTE, H.A. Carga Nuclear Efetiva e sua consequência para a compreensão da estrutura eletrônica dos átomos. Química Nova na Escola , São Paulo, n. 17, p. 22-26, 2003.	Apresentar a relação entre carga nuclear efetiva e química quântica.
104	Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental	Por que os átomos são tão pequenos?	Jorge Alberto Castro	CASTRO, J.A. Por que os átomos são tão pequenos?. Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental , Rio Grande, volume especial, p. 70-83, 2004.	Apresenta revisões sobre palestras e textos filosóficos de Schrödinger.
105	Química Nova na Escola	Estrutura Atômica e Formação dos Íons: Uma análise das Ideias dos alunos do 3º ano do Ensino Médio.	Angella da Cruz Guerra França; Maria Eunice Ribeiro Marcondes; Miriam Possar do Carmo.	FRANÇA, A.C.G; MARCONDES, M.E.R.; CARMOS, M.P. Estrutura Atômica e Formação dos Íons: Uma análise das Ideias dos alunos do 3º ano do Ensino Médio. Química Nova na Escola , São Paulo, v. 31, n. 4, p. 275-282, 2009.	Conhecimento dos alunos do ensino Médio sobre átomos e íons.
106	Ciências & Cognição	Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomos.	Henrique José Polato Gomes; Odisséa Boaventura de Oliveira	GOMES, H.J.P.; OLIVEIRA, O.B. Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomos. Ciência& Cognição , Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 96-109, 2007.	Identificar os obstáculos epistemológicos no ensino de teorias atômicas para o último ano do ensino fundamental e o primeiro ano do ensino Médio.
107	Ciência e Sociedade	On the “Missing Letter” to Lattes and the Nobel Prize in Physics	Marcio Luis Ferreira Nascimento	NASCIMENTO, M.L.F. On the “Missing Letter” to Lattes and the Nobel Prize in Physics. Ciência e Sociedade , v. 3, n. 2, p. 35-42, 2015.	Discutir sobre uma possível carta de Bohr para Lattes.
108	Revista Brasileira de História da Ciência	Truth by Fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics	Álvaro Balsas; A. Luciano L. Videira.	BALSAS, A.; VIDEIRA, A.L.L. Truth by Fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. Revista Brasileira de História da Ciência , Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 248-266, 2013.	Analisar as ocorrências que levaram a aceitação da Mecânica Quântica e realçar as opiniões discordantes sobre diferentes questões.
1	Revista	Para que serve uma função de onda?:	Fábio Freitas; Olival	FREITAS, F.; FREIRE JUNIOR, O. Para que serve uma função	Examinar as origens históricas Interpretação dos

09	Brasileira de História da Ciência	Everett, Wheeler, Bohr e uma nova interpretação da teoria quântica.	Freire Jr.	de onda?: Everett, Wheeler, Bohr e uma nova interpretação da teoria quântica. Revista Brasileira de História da Ciência , Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 12-25, 2008.	muitos-mundos da mecânica quântica, proposta por Everett.
110	Experiência em Ensino de Ciências	El Modelo Atómico y las representaciones de los adolescentes.	Sonia Beatriz González; Consuelo Escudero.	GONZÁLES, S.B.; ESCUDERO, C. El Modelo Atómico y las representaciones de los adolescentes. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 10, n. 3, p. 40-50, 2015.	Compreensão de modelos atômicos por parte dos adolescentes.
111	Experiência em Ensino de Ciências	Principios de mecânica cuántica en la resolución de problemas de estructuras atómicas en Estudiantes de química.	Concesa Caballero Sahelices; Jesús A. Menezes Villágra	SAHELICES, C.C.; VILLÁGRA, J.A.M. Principios de mecânica cuántica en la resolución de problemas de estructuras atómicas en Estudiantes de química. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 8, n. 1, p. 11-16, 2013.	Compreender até que ponto os estudantes universitários utilizam a mecânica quântica para explicar estruturas atômicas.
112	Experiência em Ensino de Ciências	Teoria atômica na concepção de alunos de turmas de 1º ano do Ensino Médio, através de avaliação da representação por desenhos.	Denise Leal de Castro; Thamires Idalino da Silva.	CASTRO, D.L.; SILVA, T.I. Teoria atômica na concepção de alunos de turmas de 1º ano do Ensino Médio, através de avaliação da representação por desenhos. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 7, n. 3, p. 97-109, 2013.	Analisar como os alunos do Ensino Médio estão concebendo as teorias atômicas.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

nº	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
113	Experiência em Ensino de Ciências	Uma proposta didática para elaboração do pensamento químico sobre elemento químico, átomos, moléculas e substâncias.	Edson José Wartha; et. al.	WARTHA, E.J.; et. al. Uma proposta didática para elaboração do pensamento químico sobre elemento químico, átomos, moléculas e substâncias. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 5, n. 1, p. 7-20, 2010.	Proposta de ensino utilizando clipes de papel.
114	Experiência em Ensino de Ciências	Analogias e contra-analogias: Um estudo sobre a viabilidade da composição entre o modelo atômico de Bohr e o sistema solar por meio de júri simulado.	Alexandre da Silva Ferry; Ronaldo Luiz Nagem.	FERRY, A.S.; NAGEM, R.L. Analogias e contra-analogias: Um estudo sobre a viabilidade da composição entre o modelo atômico de Bohr e o sistema solar por meio de júri simulado. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 4, n. 3, p. 43-60, 2009.	Utilização de júri simulado como recurso didático para o ensino-aprendizagem do modelo atômico de Bohr.
115	Experiência em Ensino de Ciências	Correspondências Estabelecidas e diferenças identificadas em atividades didáticas baseadas em analogias para o ensino de modelos atômicos	Leandro Londero da Silva; Eduardo A. Terrazzan.	SILVA, L.L.; TERRAZZAN, E.A. Correspondências Estabelecidas e diferenças identificadas em atividades didáticas baseadas em analogias para o ensino de modelos atômicos. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 3, n. 2, p. 21-37, 2008.	Utilização de analogias como ferramenta didática no ensino de modelos atômicos.
116	Experiência em Ensino de Ciências	Física de partículas y visiones epistemológicas contemporánea sem la formación postgraduada de profesores de física	Marco Antonio Moreira; Neusa Teresinha Massoni	MOREIRA, M.A.; MASSONI, N.T. Física de partículas y visiones epistemológicas contemporáneas em la formación postgraduada de profesores de física. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 4, n. 1, p. 57-64, 2009.	Experiência de Ensino de Física Moderna e contemporânea na pós-graduação.

1 1 7	Experiência em Ensino de Ciências	Relatividade no Ensino Médio: Uma experiência com motivação na história.	Jeferson Fernando de Souza Wolff; Paulo Machado Mors	WOLFF, J.F.S.; MORS, P.M. Relatividade no Ensino Médio: Uma experiência com motivação na história. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 1, n. 1, p. 14-22, 2006.	Utilização de textos históricos sobre relatividade.
1 1 8	Experiência em Ensino de Ciências	Relato sobre a implementação de uma unidade de aprendizagem sobre partículas elementares e interações fundamentais no Ensino Médio.	Lisiane Araujo Pinheiro; Sayonara Salvador Cabral da Costa	PINHEIRO, L.A.; COSTA, S.S.C. Relato sobre a implementação de uma unidade de aprendizagem sobre partículas elementares e interações fundamentais no Ensino Médio. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 4, n. 3, p. 101-116, 2009.	Aplicação de Unidade de aprendizagem.
1 1 9	Experiência em Ensino de Ciências	A elaboração conceitual em realidade escolar da noção de vazio no modelo corpuscular da matéria.	Vander Edier Ebling Samrsla; Marcelo Leandro Eichler; José Claudio Del Pino	SAMRSLA, V.E.E.; EICHLER, M.L.; PINO, J.C. A elaboração conceitual em realidade escolar da noção de vazio no modelo corpuscular da matéria. Experiência em Ensino de Ciências , Cuiabá, v. 2, n. 1, p. 27-54, 2007.	Investigação sobre os conhecimentos prévios dos estudantes.
1 2 0	ScientiaeStudia	Perspectivismo na filosofia da ciência: um estudo de caso na física quântica	Décio Krause; Jonas Rafael Becker Arenhart.	KRAUS, D.; ARENHART, J.R.B. Perspectivismo na filosofia da ciência: um estudo de caso na física quântica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 11, n. 1, p. 159-183, 2013.	Apresentar uma visão perspectivista da evolução científica.
1 2 1	ScientiaeStudia	Causalidade e teoria quântica	Patrícia Kauark Leite	LEITE, P.K. Causalidade e teoria quântica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 10, n. 1, p. 165-177, 2012.	Apresentar e discutir diferentes pontos de vista sobre a causalidade.
1 2 2	ScientiaeStudia	Indistinguibilidade, não reflexiva, ontologia e física quântica	Jonas Rafael Becker Arenhart; Décio Krause	ARENHART, J.R.B.; KRAUSE, D. Indistinguibilidade, não reflexiva, ontologia e física quântica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 10, n. 1, p. 41-69, 2012.	Apresentar a ontologizados preceitos da mecânica quântica ortodoxa.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(continua)

n. o.	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
1 2 3	ScientiaeStudia	Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da mecânica quântica.	Anderson Leite; Samuel Simon	LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da mecânica quântica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-241, 2010.	Discute a utilização da filosofia grega por Werner Heisenberg nos debates sobre a teoria quântica na primeira metade do século XX.
1 2 4	ScientiaeStudia	Modalidade, abordagem semântica e mecânica quântica	Otávio Bueno	BUENO, O. Modalidade, abordagem semântica e mecânica quântica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 2, n. 1, p. 85-97, 2004.	Nominalização de Hartry Field.
1 2 5	ScientiaeStudia	<i>Scholaquantorum</i> : progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-	Valter Alnis Bezerra	BEZERRA, V.A. <i>Scholaquantorum</i> : progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 4, n. 1, p. 463-517, 2003.	Panorama histórico do desenvolvimento conceitual da teoria quântica entre 1913-1925.

		1925.			
1 2 6	ScientiaeStudia	Entre mecânica quântica y estructuras químicas: a qué refierela química cuántica?	Olimpia Lombardi; Juan Camilo Martínez González	LOMBARDI, O.; GONZÁLES, J.C.M. Entre mecânica quântica y estructuras químicas: a qué refiere la química cuántica? ScientiaeStudia , São Paulo, v. 10, n. 4, p. 649-670, 2012.	Ontologia da mecânica quântica através do conceito <u>ligação química</u> .
1 2 7	ScientiaeStudia	La reinterpretación radical del experimento de Michelson-Morley por la relatividad especial.	Alejandro Cassini; Leonardo Levinas	CASSINI, A.; LEVINAS, L. La reinterpretación radical del experimento de Michelson-Morley por la relatividad especial. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 3, n. 4, p. 583-596, 2005.	Analisar a relação entre a teoria da relatividade e o experimento de Michelson-Morley, destacando como em diferentes contextos históricos o mesmo experimento pode ser moldado em diferentes conceitos.
1 2 8	ScientiaeStudia	La filosofía trascendental y la interpretación de Bohr de la teoría cuántica.	HernánPringe	PRINGE, H. La filosofía trascendental y la interpretación de Bohr de la teoría cuántica. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 10, n. 1, p. 179-194, 2012.	Mostrar que a filosofia de Kant articula a interpretação de Bohr sobre mecânica quântica
1 2 9	ScientiaeStudia	<i>Scholaquantorum</i> : progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte II: crítica à leitura Lakatosiana.	Valter Alnis Bezerra	BEZERRA, V.A. <i>Scholaquantorum</i> : progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte II: crítica à leitura Lakatosiana. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 2, n. 2, p. 207-237, 2004.	Analisar criticamente a reconstrução da antiga teoria quântica feita por Imre Lakatos.
1 3 0	ScientiaeStudia	A doutrina goethiana e newtoniana das cores à luz da física moderna (Conferência proferida em 5 de maio de 1941 na Sociedade da Colaboração Cultural de Budapeste)	Werner Heisenberg	HEISENBERG, W. A doutrina goethiana e newtoniana das cores à luz da física moderna (Conferência proferida em 5 de maio de 1941 na Sociedade da Colaboração Cultural de Budapeste). ScientiaeStudia , São Paulo, v. 13, n. 1, p. 207-221, 2015.	Tradução de obra original de Werner Heisenberg
1 3 1	ScientiaeStudia	Heisenberg e a doutrina das cores de Goethe e Newton	Alexandre de Oliveira Ferreira	FERREIRA, A.O. Heisenberg e a doutrina das cores de Goethe e Newton. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 13, n. 1, p. 175-206, 2015.	Introduz a conferência de Heisenberg, expõe algumas implicações filosóficas da teoria quântica.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

(conclusão)

n.º	Revista	Título	Autores	Referência e local de publicação	Enfoque
1 3 2	ScientiaeStudia	La invención del neutrino: um análisis epistemológico.	Alejandro Cassini	CASSINI, A. La invención del neutrino: um análisis epistemológico. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 10, n. 1, p.11-39, 2012.	Análise epistemológica sobre a invenção do neutrino, indo de Pauli até Cowan e Reines, passando por Fermi.
1 3 3	ScientiaeStudia	Einstein y la evidencia experimental a favor de la hipótesis del cuanto de luz.	Alejandro Cassini; Leonardo Levinas; Hernán Pringle.	CASSINI, A.; LEVINAS, L.; PRINGLE, H. Einstein y la evidencia experimental a favor de la hipótesis del cuanto de luz. ScientiaeStudia , São Paulo, v. 13, n. 1, p. 73-96, 2015	Analisar o ponto de vista de Einstein.
1 3 4	Com ciência	O que é a filosofia da física?	Oswaldo Pessoa Jr	PESSOA JUNIOR, O. O que é a filosofia da física? Com Ciência , Campinas, n. 156, 2014.	Apresentar as diferentes filosofias da física como o determinismo.
1	Com Ciência	Buraco Negro de Pandora	Roberto Belisário	Belisário, R. Buraco Negro de Pandora. Com Ciência ,	Apresentar uma conferência feita por Hawking.

3 5				Campinas, n.156, 2014.	
1 3 6	Com Ciência	Cosmologia: De Einstein à energia escura	Jaílson S. Alcaniz	ALCANIZ, J.S. Cosmologia: De Einstein à energia escura. Com Ciência , Campinas, n .90, 2007.	Cosmologia.
1 3 7	Com Ciência	Teoria da relatividade e a história da ciência	Gildo Magalhães	MAGALHÃES, G. Teoria da relatividade e a história da ciência. Com Ciência , Campinas, n. 63, 2005.	Correlacionar história e a teoria da relatividade.
1 3 8	Com Ciência	A nova causalidade	Mário Novello	NOVELLO, M. A nova causalidade. Com Ciência , Campinas, n. 63, 2005.	Relacionar causalidade e mecânica quântica.
1 3 9	Com Ciência	O significado de tempo: Einstein e Bergson.	Márcio Barreto	Barreto, M. O significado de tempo: Einstein e Bergson. Com Ciência , Campinas, n. 63, 2005.	Análise entre tempo filosófico e tempo físico.

Quadro 3- Artigos encontrados relacionados com a mecânica quântica

