



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

FRANCELINE CARDOSO

**UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O
ENSINO DE INTRODUÇÃO A FÍSICA QUÂNTICA NA
FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA**

Londrina
2021

FRANCELINE CARDOSO

**UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O
ENSINO DE INTRODUÇÃO A FÍSICA QUÂNTICA NA
FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Irinéa de Lourdes Batista

Londrina
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Cardoso, Franceline.

UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O ENSINO DE INTRODUÇÃO A FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA / Franceline Cardoso. - Londrina, 2021.

260 f. : il.

Orientador: Irinéa de Lourdes Batista.

Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Números Quânticos - Tese. 2. Abordagem Didática - Tese. 3. História da Ciência - Tese. 4. Formação inicial de professores - Tese. I. Batista, Irinéa de Lourdes. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática. III. Título.

CDU 50

FRANCELINE CARDOSO

**UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O
ENSINO DE INTRODUÇÃO A FÍSICA QUÂNTICA NA
FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Irinéa de Lourdes Batista
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Marcelo Alves de Carvalho
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Walter Anibal Rammazzina Filho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná-
UTFPR

Londrina, 14 de abril de 2021.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente minha família e amigos que estiveram comigo durante a realização desse trabalho, que me apoiaram e acreditaram em mim em momentos em que nem eu mesma acreditava.

Á minha orientadora Irinéa de Lourdes Batista, por me proporcionar inspiração para a realização dessa pesquisa. Pela confiança, dedicação e paciência. Por me acompanhar e orientar durante o período de mestrado, por sua compreensão e paciência durante nossas longas reuniões de orientação, por suas inúmeras contribuições e por sua humanidade em meio ao ambiente acadêmico e pessoal.

Aos professores da banca, Prof. Dr. Marcelo Alves de Carvalho e Prof. Dr. Walter Anibal Rammazzina Filho, por terem aceitado o convite para participar da banca avaliadora e por suas contribuições e sugestões que permitiram o aperfeiçoamento dessa pesquisa.

Agradeço meu psicólogo Bruno Guerra por todo apoio emocional durante a realização dessa pesquisa, sem seu apoio certamente não teria conseguido desenvolver essa pesquisa.

Á minha amiga e “irmã de orientação” Marina Donegá Neves por sua amizade, compreensão e por aguentar minhas lamúrias, reclamações e anseios a respeito da dissertação. Agradeço a ela pelos inúmeros cafés tomados no laboratório de pesquisa, pelas suas contribuições, mas principalmente por sua companhia e momentos de descontração que me ajudaram imensamente durante essa jornada.

Ao meu companheiro de grupo de pesquisa Matheus Rossi de Souza por me ajudar imensamente a divulgar os questionários dessa pesquisa aos licenciandos em Física e por me apoiar sempre.

A todos os licenciandos que gentilmente aceitaram participar dessa pesquisa.

Aos integrantes do grupo de pesquisa IFHIECEM (Investigações em Filosofia e História da Ciência, e Educação Matemática) pelas contribuições pessoais e profissionais durante nossas reuniões.

Á CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização dessa pesquisa.

Aos meus queridos animais de estimação Juma, Chopp, Floca, Beta e Negy por sua companhia e amor incondicional. Menciono honrosamente meu querido e estimado gatinho Galileu que hoje infelizmente brilha em outras dimensões.

Á todos os deuses ou a quaisquer forças superiores do universo que tenham

me ajudado a concluir essa dissertação.

A todos os citados o meu MUITO OBRIGADA!!

CARDOSO, Franceline. **Uma Abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Introdução a Mecânica na Formação Inicial de Professores de Física**. 2021. 260 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

Essa pesquisa apresenta uma discussão a respeito da importância da inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Mesmo conhecendo a importância e os argumentos favoráveis a essa inserção, diversas pesquisas indicam que ela de fato não ocorre efetivamente. Dentre os motivos que dificultam essa inserção destacamos as limitações presentes na formação inicial de professores de Física. Tendo em vista essas questões desenvolvemos esse trabalho com o objetivo de investigar metodologicamente a construção de uma Abordagem Didática com enfoque histórico-conceitual a respeito do conceito de Números Quânticos que tenha a potencialidade de enriquecer a base conceitual desses licenciandos e por consequência contribua para sua formação docente. Para atender a esse objetivo, aplicamos um questionário a licenciandos de Física que já haviam cursado disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica, contendo questões a respeito de aspectos conceituais da Mecânica Quântica e do conceito de Números Quânticos, além de aspectos da Natureza do Conhecimento Científico. Os dados empíricos provenientes desses resultados foram analisados por meio da Análise de Conteúdo, segundo Bardin (2011). Por meio de nossas análises foi possível identificar limitações conceituais e noções alternativas a respeito dos conceitos abordados. Baseamos assim a construção da Abordagem Didática proposta nos resultados obtidos pela análise dos dados empíricos de forma que ela tivesse o potencial de sanar as dificuldades conceituais identificadas. Além dos resultados empíricos nossa abordagem se baseou nos referenciais teórico metodológicos da Aprendizagem Significativa, das Unidades Didáticas e da Composição histórico-conceitual.

Palavras-chave: números quânticos; abordagem didática; história da ciência; ensino de física; formação inicial de professores.

CARDOSO, Franceline. **A Conceptual-Historical Approach to Teaching Introduction to Mechanics in Initial Training of Physics Teachers.** 2021. 260 f. Dissertation (Master Degree in Teaching of Science and Mathematics Education) – State University of Londrina, Londrina, 2021.

ABSTRACT

This research presents a discussion about the importance of inserting Modern and Contemporary Physics topics in High School. Even though we know the importance and the arguments in favor of this insertion, several studies indicate that it does not occur effectively. Among the reasons that hinder this insertion, we emphasize the limitations present in the initial training of Physics teachers. In view of these issues, we developed this work with the objective of methodologically investigating the construction of a Didactic Approach with a conceptual-historical approach to the concept of Quantum Numbers that has the potential to enrich the conceptual basis of these undergraduate students and, consequently, contribute to their teacher education. To meet this objective, we applied a questionnaire to Physics undergraduates who had already taken Introduction to Quantum Mechanics, containing questions about conceptual aspects of Quantum Mechanics and the concept of Quantum Numbers, as well as aspects of the Nature of Scientific Knowledge. The empirical data from these results were analyzed using Content Analysis, according to Bardin (2011). Through our analyses it was possible to identify conceptual limitations and alternative notions about the concepts addressed. Thus, we based the construction of the proposed Didactic Approach on the results obtained by analyzing the empirical data so that it had the potential to remedy the conceptual difficulties identified. In addition to the empirical results, our approach was based on the theoretical and methodological frameworks of Meaningful Learning, Teaching Units, and Historical and Conceptual Composition.

Key words: quantum numbers; didactic approach; history of science; physics teaching; initial teacher education.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Principais elementos constituintes do Vê epistemológico de Gowin56
- Figura 2** - Versão mais completa dos elementos constituintes do diagrama em Vê de Gowin.....57
- Figura 3** - Representação das ondas de probabilidade de um átomo de hidrogênio, cada qual correspondendo a um estado possível187

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1** - Chave de pontuação para diagramas em “Vê”, desenvolvida para utilização com estudantes de ciências do ensino médio.....60
- Quadro 2** - Resultados da questão 1 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica80
- Quadro 3** - Resultados da questão 2 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.....83
- Quadro 4** - Resultados da questão 3 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.....87
- Quadro 5** - Resultados da questão 4 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica90
- Quadro 6** - Resultados da questão 5 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica94
- Quadro 7** - Resultados da questão 6 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica97
- Quadro 8** - Resultados da questão 7 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica101
- Quadro 9** - Resultados da questão 8 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica103
- Quadro 10** - Resultados da questão 2 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....105
- Quadro 11** - Resultados da questão 3 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....108
- Quadro 12** - Resultados da questão 4 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....109
- Quadro 13** - Resultados da questão 5 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....111
- Quadro 14** - Resultados da questão 6 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....113
- Quadro 15** - Resultados da questão 7 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....115
- Quadro 16** - Resultados da questão 8 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica.....116

Quadro 17 - Atividades propostas para as Unidades Didáticas190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
FMC	Física Moderna e Contemporânea
HC	História da Ciência
HFC	História e Filosofia da Ciência
IFHIECEM	Investigações em Filosofia e História da Ciência, e Educação em Ciências e Matemática
MQ	Mecânica Quântica
NDCC	Natureza do Conhecimento Científico
PCN	Parâmetros Curriculares Nacional
UD	Unidade Didática
UC	Unidade de Contexto
UR	Unidade de Registro
URE	Unidade de Registro Emergente
UEL	Universidade Estadual de Londrina

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1 SABERES DOCENTES	18
1.1 PROFESSOR COMO PROFISSIONAL REFLEXIVO	18
1.2 BASE DE CONHECIMENTOS NECESSÁRIOS PARA A PRÁTICA DOCENTE	21
1.3 REPERTÓRIO DE CONHECIMENTOS NECESSÁRIO PARA A PRÁTICA DOCENTE	28
1.4 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ASPECTOS DA NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO E A FORMAÇÃO DE PROFESSORES	34
1.5 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE FÍSICA.....	36
2 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS ..	41
2.1 ASPECTOS A RESPEITO DA NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO	44
2.2 CUIDADOS METODOLÓGICOS HISTORIOGRÁFICOS	48
3 FUNDAMENTAÇÕES PARA A ELABORAÇÃO DE UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL	52
3.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	52
3.1.1 O V Epistemológico	55
3.2 UNIDADES DIDÁTICAS (UD)	62
3.3 COMPOSIÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL	64
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA OS ESTUDOS EMPÍRICOS	66
4.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO	68
4.1.1 Unidades de Contexto (UC) e Unidades de Registro (UR) do Questionário Enviando aos Licenciandos	69
5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS EMPÍRICOS	80

5.1	RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO QUESTIONÁRIO ENVIADOS A LICENCIANDOS QUE CURSARAM DISCIPLINAS DE INTRODUÇÃO A MECÂNICA QUÂNTICA	80
5.2	RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO QUESTIONÁRIO ENVIADOS A LICENCIANDOS QUE NÃO CURSARAM DISCIPLINAS DE INTRODUÇÃO A MECÂNICA QUÂNTICA	105
6	UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O ENSINO DE NÚMEROS QUÂNTICOS ATÔMICOS	118
6.1	COMPOSIÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL	118
6.1.1	Modelo Atômico de Niels Bohr	119
6.1.2	Arnold Sommerfeld: Condições de Quantização Adicionais	126
6.1.3	Modelo de Bohr-Sommerfeld: A Descrição do Sistema Periódico	133
6.1.4	Modelo do Núcleo Atômico	148
6.1.5	O Princípio de Exclusão	152
6.1.6	O Spin do Elétron	161
6.1.7	Formulações da Mecânica Quântica	172
6.1.8	O Princípio de Incerteza	184
6.1.9	A interpretação de Complementaridade	186
6.1.10	O Modelo Ondulatório de Átomo	186
6.2	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	189
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	199
	APÊNDICES.....	209
	APÊNDICE A.....	209
	ANEXOS	215
	ANEXO A.....	215
	ANEXO B.....	217
	ANEXO C	218
	ANEXO D	220
	ANEXO E.....	223
	ANEXO F	237

INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos e pesquisas realizadas na área de Ensino de Ciências evidenciam a importância do ensino da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Os argumentos usados para justificar o ensino de Física Moderna no Ensino Médio são diversos, de acordo com Terrazzan (1992) o ensino de Física Moderna torna-se imprescindível visto que aparelhos atuais e fenômenos do cotidiano, em grande parte, são compreendidos apenas utilizando conceitos instituídos na virada do século XX. O cotidiano no qual o estudante está inserido assume papel fundamental na definição dos conteúdos relevantes e potencialmente significativos a serem ensinados (TERRAZZAN, 1992).

É crescente o número de pesquisas que destacam as diversas razões favoráveis à inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, entre esses tópicos enfatizaremos a Física Quântica. A Física Quântica é uma componente emblemática e importante da Física Contemporânea, contendo um dos principais desenvolvimentos teóricos e mudanças de paradigmas da Física Contemporânea. Além disso é base de diversas inovações tecnológicas e é um símbolo de “Ciência legal” na cultura popular (JOHANSSON *et. al.* 2018).

No entanto, ainda há uma grande defasagem entre os conteúdos ensinados nas aulas de Física do Ensino Médio e os avanços científicos atuais, o que pode resultar em uma prática pedagógica desvinculada e descontextualizada da realidade dos estudantes. Diversas razões e dificuldades podem ser apontadas para essa defasagem, mas neste trabalho focaremos na formação inicial de professores de Física.

Considerando os argumentos apresentados acima, peço permissão para falar em primeira pessoa para esclarecer os motivos que instigaram a realização desta pesquisa. O início das minhas preocupações a respeito desse tema se deu durante meu curso de graduação, realizado na Universidade Estadual de Londrina- UEL, especificamente em uma disciplina de Didática, em que essa discussão foi levantada. Nesse momento ainda não almejava realizar este trabalho, mas essa questão continuou me inquietando.

No decorrer de minha graduação, cursei a disciplina de Física Moderna I A e B, que em seu conteúdo programático englobava toda a Introdução a Mecânica Quântica. Dentre os assuntos abordados estavam a equação de Schroedinger e suas

relações com os números quânticos e estas foram as questões que mais me inquietaram durante alguns anos: De onde surgiram os números quânticos? Qual a sua função na teoria da Mecânica Quântica? São elementos puramente teóricos ou possuem correspondência empírica?

Após a término da disciplina, essas questões não tinham sido resolvidas. Pelo contrário, se tornaram ainda mais vívidas pois essas se juntaram com a questão do Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Estaria eu preparada apenas com meu curso de graduação para ensinar conteúdos de Física Moderna e Contemporânea? A resposta que pairava sobre mim era que não, não estava preparada porque me faltavam muitos esclarecimentos conceituais.

No ano seguinte, cursei a disciplina de Evolução dos Conceitos e Teorias Físicas que foi ministrada na época pela orientadora desta dissertação, Profa. Dra. Irinéa de Lourdes Batista. Nessa disciplina tive contato com as contribuições que a História e Filosofia da Ciência (HFC) e o conhecimento dos aspectos da Natureza do Conhecimento Científico (NDCC) podem trazer ao Ensino de Ciências e foi então que decidi que queria fazer um pós-graduação em Ensino de Ciências e comecei a participar das reuniões do grupo de pesquisa IFHIECEM¹.

Particpei do processo de seleção para o mestrado e fui aprovada, e desde então tenho me dedicado a desenvolver a presente dissertação, em que juntei duas de minhas inquietações, o problema da formação de professores de Física para o ensino de Física Moderna e Contemporânea e o conceito específico de Números Quânticos.

Devido aos motivos citados acima, o presente trabalho teve o objetivo de investigar metodologicamente a construção de uma Abordagem Didática a respeito do conceito de Números Quânticos que tenha o potencial de enriquecer a base conceitual de Licenciandos(as) de Física.

A fim de atingir o objetivo pretendido, o processo de elaboração e investigação metodológica da Abordagem Didática ocorreu por meio de duas etapas principais. A primeira delas foi identificar os conhecimentos prévios e possíveis noções conceituais inadequadas (ou inexistentes) em relação ao referencial científico de Licenciandos(as) que já haviam cursado disciplinas que abordavam o tema proposto na Abordagem.

¹ Grupo de pesquisa Investigações em Filosofia e História da Ciência, e Educação em Ciências e Matemática.

Além do tema específico do conceito de Números Quânticos, buscamos também identificar as noções e concepções desses licenciandos(as) a respeito da Natureza do Conhecimento Científico.

A segunda etapa dessa investigação foi elaborar uma Abordagem-Didática com enfoque Histórico-Conceitual, com a potencialidade de enriquecer a base conceitual de licenciandos em Física além de sanar as dificuldades conceituais e apresentar discussões a respeito das noções alternativas identificadas por meio dos questionários. Dessa forma, buscamos com essa investigação contribuir para os estudos a respeito da formação inicial de professores de Física e das contribuições da História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências.

Para atender aos objetivos mencionados estruturamos esse trabalho em seis capítulos. No primeiro capítulo apresentamos a fundamentação teórica a respeito dos Saberes Docentes e as contribuições que a HFC e o conhecimento dos aspectos da Natureza do Conhecimento Científico podem proporcionar para a prática docente. Enfatizamos também nesse capítulo a importância do conhecimento conceitual dos conteúdos da disciplina de atuação do professor.

No segundo capítulo apresentamos as contribuições da HFC e dos aspectos da Natureza do Conhecimento Científico para o ensino de Ciências. Discorremos ainda a respeito dos cuidados teórico-metodológicos que devem ser tomados quando realizamos pesquisas históricas.

No terceiro capítulo apresentamos os principais conceitos e definições dos referenciais teórico-metodológicos utilizados na elaboração da Abordagem Didática. Os referenciais utilizados foram o da Aprendizagem Significativa, das Unidades Didáticas e das Composições Histórico-Conceituais.

No quarto capítulo apresentamos os procedimentos metodológicos adotados nos estudos empíricos dessa investigação. Por se tratar de uma investigação qualitativa de cunho interpretativo nos embasamos referencial teórico de Bogdan e Biklen (1994). A análise dos dados utilizamos a Análise de Conteúdo de acordo com o referencial teórico de Bardin (2011), em que realizamos uma Análise Temática dos resultados provenientes dos questionários.

No quinto capítulo apresentamos os resultados e discussões provenientes da aplicação dos questionários e discussões a respeito das noções alternativas identificadas a respeito do conceito de Números Quânticos.

No sexto capítulo apresentamos a abordagem histórico-conceitual

desenvolvida, articulando os referenciais teórico-metodológicos da Aprendizagem Significativa das unidades didáticas e das Composições Histórico-Conceituais e a Composição Histórico-Conceitual a respeito do conceito de Números Quânticos.

Por fim, apresentamos nossas considerações finais, referências utilizadas, e apêndices e anexos citados ao longo do trabalho.

1 SABERES DOCENTES

Considerando que esta investigação se insere no contexto da formação inicial de professores de Física, discorreremos nesse capítulo a respeito dos saberes docentes, ou seja, os saberes necessários para o exercício da prática docente.

Os aspectos relacionados aos saberes docentes continuam sendo alvo de constantes debates em estudos e pesquisas. E levando em conta o alto grau de complexidade e elementos que devem ser considerados, esses estudos não ocorrem de forma trivial.

É tido como consenso, que a prática profissional docente requer uma combinação entre uma rede de saberes e conhecimentos que forneçam subsídios para que os futuros docentes possam enfrentar os desafios e incertezas da realidade da prática docente. Dessa forma, as pesquisas nesse âmbito visam contribuir para uma formação docente adequada, e por consequência contribuir para o ensino de maneira geral.

Devido à grande complexidade, e talvez a impossibilidade, de caracterizar como deve ocorrer o processo de formação docente, e quais os saberes necessários para sua prática, diversos estudos buscam entender como se dá esse processo, considerando primordialmente as condições da realidade profissional dos professores.

Apresentaremos a seguir as contribuições dos estudos de Schön (1997) a respeito do conceito de “Professor Reflexivo”, e os estudos de Shulman (1986, 1987) e Gauthier e colaboradores (1998) a respeito de saberes docentes.

1.1 PROFESSOR COMO PROFISSIONAL REFLEXIVO

O conceito de “Professor Reflexivo”, proposto por Donald Schön e baseado nos estudos de Dewey, emergiu na década de 1980, e foi retomado no início da década de 1990, período em que os Estados Unidos enfrentava um período marcado por processos cíclicos de reforma educativa (SCHÖN, 1997, CAMPOS; PESSOA, 2003).

Segundo Schön (1997), as reformas educativas proporcionam uma oportunidade de examinar questões referentes ao ensino e a formação de professores, e assim expõe três questões norteadoras, a saber: (1) Quais competências os professores deveriam ajudar os estudantes a desenvolver? (2) Qual a natureza dos conhecimentos e de saber - fazer que permitem aos professores

desempenhar sua profissão de maneira eficaz? (3) Que tipos de formação serão mais viáveis para oferecer a capacitação necessária para o desempenho do trabalho docente? Schön (1997) enfatiza que a relevância de analisar essas questões se relaciona ao fato de a crise de confiança no conhecimento profissional docente desencadear a busca por uma nova epistemologia de prática profissional.

Vinculado com as reformas educativas e sua proposta de reorientar o modelo de formação de professores, problematizando as relações existentes entre a teoria e a prática, Schön apresenta ainda uma crítica a respeito da racionalidade técnica, no qual o professor “deve primeiro ter uma formação teórico-técnica para posteriormente, fazer da prática uma instância de aplicação da teoria ou das prescrições técnicas” (FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003, p.308). Desse modo os professores atuam como técnicos, de conhecimentos científicos e objetivos prescritos externamente (VALADARES, 2008).

O desenvolvimento de uma prática reflexiva, na concepção de Schön, baseia-se em três conceitos: o conhecimento na ação, a reflexão na ação e a reflexão sobre a reflexão na ação. O conhecimento na ação consiste em um conhecimento tácito, essencialmente reativo, no qual o professor quando se defronta com um problema utiliza seu conhecimento tácito e idiossincrático concebido a partir de experimentações e/ ou reflexões anteriores, desse modo:

O conhecimento na ação não está carregado apenas de um certo “saber escolar”, mas também está colado a um certo modo de enfrentamento das situações do cotidiano e revelam um conhecimento “espontâneo, intuitivo e experimental” (idem, p.82). O conhecimento, portanto, está na ação em si, e o revelamos por meio de ações espontâneas a habilidades. Essa ação não exige o uso de uma explicação verbal ou de uma descrição ou mesmo de um pensamento sistematizado (CAMPOS; PESSOA, 2003, p.196).

O conhecimento na ação está relacionado nas ações docentes que ocorrem simultaneamente aos imprevistos e problemas que eventualmente o professor encontra em seu cotidiano, e podem ser alvo de reflexões futuras (VALADARES, 2008).

O processo de reflexão na ação ocorre posteriormente ao acontecimento quando é possível observar e refletir a respeito dos conhecimentos que mobilizamos durante a ação (conhecimento na ação). Para Schön o processo de reflexão na ação se relaciona diretamente a ação e consiste em fazer uma pausa para refletir, durante a ação a fim de reorganizar o que estamos fazendo (SCHÖN, 1997).

Dessa forma é possível ao professor tomar consciência de suas ações e

explicitá-las e a partir dessa tomada de consciência gerar mudanças e propor novas soluções para os problemas encontrados (CAMPOS; PESSOA, 2003), ou seja, “É ao refletir sobre a acção que se consciencializa o conhecimento tácito, se procuram crenças erróneas e se reformula o pensamento” (OLIVEIRA; SERRAZINA, 2002, p.31).

O processo de reflexão sobre a reflexão na acção, como proposto por Schön, ocorre por meio de um distanciamento da acção presente, para que seja possível realizar uma reflexão retrospectiva a respeito de suas acções e suas reflexões durante a acção (conhecimento na acção e reflexão na acção) e assim intenta produzir uma descrição verbal e sistematizada da reflexão na acção. Além disso, é preciso refletir a respeito dessa descrição resultante e dessa forma proporcionar mudanças em acções futuras (CAMPOS; PESSOA, 2003, OLIVEIRA; SERRAZINA, 2002), portanto “a reflexão sobre a reflexão na acção é aquela que ajuda o profissional a progredir no seu desenvolvimento e a construir a sua forma pessoal de conhecer” (OLIVEIRA; SERRAZINA, 2002, p.31).

As contribuições dos estudos de Schön no âmbito educacional e a ideia de reflexão se relaciona com a maneira de lidar com os problemas e incertezas advindos do cotidiano e constitui-se por um vai e vem de experiências, compreensões e reflexões (OLIVEIRA; SERRAZINA, 2002).

A epistemologia proposta por Schön para a formação de professores, se baseia na reflexão na acção como forma de superar a racionalidade técnica e promover uma outra base epistemológica centrada na reflexão, pois “ao refletir na acção, encontramos soluções para o problema que se apresenta no contexto do cotidiano, e não a aplicação de uma solução estabelecida anteriormente, criada fora do contexto” (CAMPOS; PESSOA, 2003, p.199).

Apesar de sua importância, as contribuições propostas por Schön sofreram algumas críticas. Em primeiro lugar o processo de reflexão é tratado por Schön como um processo solitário, no qual o professor reflete a respeito de sua prática individual e comunica-se apenas com a situação de sua prática (CAMPOS; PESSOA, 2003, VALADARES, 2008). Segundo Valadares (2008), os estudos que emergiram de contextos de sala de aula apontam para a potencialidade desse conceito (Professor Reflexivo) ao enfatizar a possibilidade de construção de saberes docentes pelos docentes e pôr em relevo essa produção como uma produção coletiva. Campos e Pessoa (2003) consideram a reflexão como uma prática social e por isso essa reflexão

deve ocorrer em conjunto com outros profissionais.

Outro aspecto a ser considerado se deve ao fato de o conceito de professor reflexivo sugerir aparentemente uma negação a respeito do papel da teoria nos processos de reflexão, especialmente no que diz respeito as teorias específicas de ensino e aprendizagem (FIORENTINI; SOUZA JR; MELO, 2003). Devemos deixar claro que para cumprir com o objetivo de formar professores reflexivos no sentido de formar profissionais autônomos e críticos, os processos de reflexão devem ocorrer “à luz de um referencial teórico, e assim, fica evidente a necessidade de uma formação teórica do professor que possibilite o resgate de sua prática” (VALADARES, 2008, p.199).

Dessa forma, enfatizamos que formar um professor reflexivo tem o propósito de incluir os problemas da prática docente em um processo de análise que vai além de intenções e atuações pessoais, mas que leva em consideração os conhecimentos teóricos, advindo de pesquisas, para fazê-lo. Assim “uma prática reflexiva proporciona aos professores oportunidades para o seu desenvolvimento, tornando-os profissionais mais responsáveis, melhores e mais conscientes” (OLIVEIRA; SERRAZINA, 2002, p. 37).

Portanto uma prática reflexiva, deve levar em conta a integração entre os conhecimentos e saberes teóricos e a prática docente. Para isso é indispensável o conhecimento a respeito dos aspectos relacionados aos saberes e conhecimentos necessários para a ação docente.

1.2 BASE DE CONHECIMENTOS NECESSÁRIOS PARA A PRÁTICA DOCENTE

Partindo da concepção do professor como um profissional reflexivo, investigador de sua própria prática, apresentaremos agora uma síntese a respeito dos saberes e conhecimentos necessários para a formação docente de acordo com as contribuições de Lee Shulman (1986, 1987, 2015) e de Gauthier e colaboradores (1998). Os referidos autores foram escolhidos por apresentarem um estudo sistematizado a respeito da caracterização dos saberes docentes e por serem autores de referência na área (ALMEIDA; BIAJONE, 2007).

Em seu trabalho “*Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching*” (“Os Que Compreendem: Crescimento do Conhecimento no Ensino”) (1986) Lee Shulman apresenta algumas considerações a respeito dos programas de formação, das

reformas educacionais e exames de avaliação e certificação de professores, e posteriormente apresenta uma sistematização dos saberes docentes em categorias. Ele inicia seu trabalho, com uma frase de George Bernard Shaw, que segundo ele tinha atormentado os profissionais docentes por aproximadamente um século, *“He who can, does. He who cannot, teaches”*². De acordo com o autor, essa frase consiste em um insulto e desvalorização da profissão docente, mas que ainda poderia ser facilmente repetida até mesmo por professores. E apresenta a seguinte indagação: Onde foi que essa degradante imagem da capacidade e competência dos professores se originou?

Após expressar sua indignação a respeito da imagem da profissão docente disseminada pela frase supracitada, Shulman (1986) apresenta uma análise comparativa dos exames necessários para licenciar professores na época (década de 1980) e os exames realizados no século passado. A partir dessa análise ele identificou que a ênfase dada ao conteúdo a ser lecionado presente nos exames de qualificação do século passado, apresentava um forte contraste com as políticas emergentes nos anos 80, no que dizia respeito aos testes de avaliação de professores que enfatizava predominantemente a capacidade dos professores em ensinar.

Ao constatar tal fato, Shulman (1986) faz menção a frase de Shaw e argumenta que talvez, Shaw tenha se antecipado com precisão dos padrões de ensino que seriam implantados em 1985. Adaptando a frase para: *“He who Knows, does. He who cannot, but knows some teaching procedures, teaches”*³ (SHULMAN, 1986, p. 2).

Shulman (1986) se refere a essa ausência dos aspectos relacionados ao conteúdo nas pesquisas e nos testes seletivos de professores, e a ênfase dada a capacidade do professor de ensinar (questões didático-pedagógicas) como o problema do “paradigma perdido” e defende sua recuperação no sentido de valorizar o conhecimento do professor a respeito do conteúdo que leciona (SHULMAN, 1986, FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003).

O “paradigma perdido”, como descrito por Shulman (1986) se refere a um ponto cego em relação aos conteúdos disciplinares, característica da maioria das pesquisas a respeito do ensino na época, o que conseqüentemente refletia nos programas de avaliação e certificação de professores. Segundo ele as pesquisas em Ensino

² Em uma tradução livre: “Aquele que pode, faz. Aquele que não pode, ensina”.

³ Em uma tradução livre: “Aquele que sabe, faz. Aquele que não sabe, mas conhece alguns procedimentos de ensino, ensina”.

desconsideravam questões relacionadas ao conteúdo e dava

[...] ênfase em como os professores administram suas salas de aula, organizam atividades, atribuem tempo e turnos, estruturam tarefas, atribuem elogios e punições, formulam os níveis de suas perguntas, planejam lições e julgam a compreensão geral do aluno ⁴(SHULMAN, 1986, p. 5).

Ao destacar a ênfase dada aos conhecimentos didático-pedagógicos e o esquecimento do conteúdo, aspecto que julga de extrema importância para a prática docente, Shulman (1986) deixa claro em sua obra que seu trabalho não tem a intenção de minimizar a importância do conhecimento e habilidades pedagógicas na formação docente, mas defende a necessidade de mesclar adequadamente esses dois aspectos, e para a obtenção desse objeto é preciso dispendir uma maior atenção ao conteúdo disciplinar (SHULMAN, 1986).

Ainda em relação as pesquisas relacionadas ao ensino, Fiorentini, Souza Junior e Melo (2003) pontuam que

Embora no início da década de 90 tenhamos passado a reconhecer a complexidade da prática pedagógica e, desde então, venha-se buscando novos enfoques e paradigmas para compreender a prática docente e os saberes pedagógicos e epistemológicos relativos ao conteúdo escolar a ser ensinado/aprendido, estes parecem continuar sendo, ao menos no Brasil, pouco valorizados pelas investigações e pelos programas de formação de professores (FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003, p.314).

O objetivo dos estudos de Shulman (1986) era contribuir para a estruturação de uma base teórica buscando identificar quais eram os domínios e categorias do conhecimento do conteúdo da matéria ensinada na mente dos professores compondo assim uma “base de conhecimentos” ⁵(SHULMAN, 1986, FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003).

De acordo com seu objetivo, de compreender como o conhecimento se desenvolve na mente dos professores, com ênfase no conteúdo da disciplina ensinada, Shulman (1986) sugere a distinção de três categorias de conhecimento presentes no desenvolvimento cognitivo do professor: *Subject matter content Knowledge* (conhecimento do conteúdo da disciplina a ser ensinada); *pedagogical content knowledge* (conhecimento pedagógico do conteúdo); *curricular knowledge* (conhecimento curricular).

⁴ Tradução livre. Texto original: “The emphasis is on how teachers manage their classrooms, organize activities, allocate time and turns, structure assignments, ascribe praise and blame, formulate the levels of their questions, plan lessons, and judge general student understanding”.

⁵ No trabalho original: “knowledge base”.

O conhecimento do conteúdo da disciplina a ser ensinada se refere a compreensão do conteúdo em si, na mente dos professores. De acordo Shulman (1986) o domínio do conteúdo a ser ensinado deve ir além do conhecimento de regras, fatos e conceitos do conteúdo, dessa forma

[...] o domínio da estrutura da disciplina não se resume tão somente à detenção bruta dos fatos e conceitos do conteúdo, mas também à compreensão dos processos de sua produção, representação e validação epistemológica, o que requer entender a estrutura da disciplina compreendendo o domínio atitudinal, conceitual, procedimental, representacional e validativo do conteúdo (ALMEIDA; BIAJONE, 2007, p. 287-288 grifo nosso).

Na concepção de Fiorentini, Souza Junior e Melo (2003) o conhecimento no conteúdo pelo professor deve englobar além do conhecimento sintático (regras e conceitos), um conhecimento substantivo e epistemológico, por isso é necessário que o professor tenha conhecimentos relativos

[...] à natureza e aos significados dos conhecimentos, ao desenvolvimento histórico das idéias, ao que é fundamental e ao que é secundário, aos diferentes modos de organizar os conceitos e princípios básicos da disciplina, e às concepções e crenças que os sustentam e legitimam [...] (FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003, p. 316 grifo nosso).

Shulman (1986) também salienta em seu trabalho a necessidade de um conhecimento a respeito da epistemologia e desenvolvimento histórico da disciplina e/ou área em que atuará como docente, dessa forma

O professor precisa não somente compreender que algo é assim; o professor também deve compreender por que é assim, em que bases suas garantias podem ser afirmadas, e sob que circunstâncias nossa crença em sua justificação pode ser enfraquecida e até mesmo negada. Além disso, esperamos que o professor compreenda por que um determinado tópico é particularmente central para a disciplina enquanto outro qualquer pode ser periférico ⁶ (SHULMAN, 1986, p. 6, tradução nossa).

A segunda categoria de conhecimento do conteúdo, é o conhecimento pedagógico do conteúdo, que segundo Shulman (1986), vai além do conhecimento do conteúdo em si, para uma dimensão no qual o professor desenvolve o conhecimento da matéria para o ensino. É, portanto, uma forma particular de conhecimento do conteúdo a ser ensinado, que incorpora a forma como o professor apresenta o conteúdo, pertinentemente, para que se tornem compreensíveis e ensináveis (SHULMAN, 1986; SILVA; MARTINS 2018).

⁶ Tradução livre. Texto original: "The teacher needs not only understand that something is so; the teacher must further understand why it is so, on what grounds its warrant can be asserted, and under what circumstances our belief in its justification can be weakened and even denied. Moreover, we expect the teacher to understand why a given topic is particularly central to a discipline whereas another may be somewhat peripheral"

O conhecimento pedagógico do conteúdo pode incluir, para a maioria dos tópicos de uma disciplina a ser ensinada, diversas formas de representação das ideias, como: analogias, ilustrações, exemplos, explicações e demonstrações (FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003, SILVA; MARTINS, 2018). Na concepção de Almeida e Biajone (2007) o conhecimento pedagógico do conteúdo

[...] vai, além do conhecimento da disciplina por si mesma, para uma dimensão do conhecimento da disciplina para o ensino. Para o autor, a chave para distinguir a base do conhecimento do ensino repousa na interseção de conteúdos e pedagogia, na capacidade que um professor tem de transformar o conhecimento do conteúdo que ele possui em formas que sejam pedagogicamente eficazes e possíveis de adaptação às variações de habilidade e contexto apresentados pelos alunos (ALMEIDA; BIAJONE, 2007, p. 288).

Ainda relacionado ao conhecimento pedagógico do conteúdo, Shulman pontua que esse conhecimento também deve incluir

[...] a compreensão do que torna o aprendizado de um tópico específico fácil ou difícil: as concepções e preconceitos que estudantes de diferentes idades e origens trazem consigo para a aprendizagem dos tópicos e lições mais frequentemente ensinadas⁷ [...] (SHULMAN, 1986, p. 7, tradução nossa).

Ou seja, argumenta, que se os preconceitos trazidos pelos alunos, forem concepções errôneas em relação ao referencial científico, o que frequentemente acontece, o professor precisará de conhecimento de estratégias que se tornem frutíferas para reorganizar a compreensão dos estudantes. Dessa forma, é necessário considerar os conhecimentos prévios dos alunos, pois é improvável que os estudantes apareçam como “tábulas rasas”. Shulman (1986) enfatiza ainda que os estudos relacionados as concepções equivocadas dos alunos a respeito de algum assunto ou conteúdo e suas consequências ao ensino, encontra-se dentre os tópicos mais férteis das pesquisas cognitivas.

No que concerne ao conhecimento do currículo, Shulman (1986) argumenta que se frequentemente ocorre certa omissão no ensino do conhecimento pedagógico do conteúdo nos cursos de formação de professores, há um descaso ainda maior em relação ao conhecimento curricular. Segundo ele

O currículo é representado por toda a variedade de programas concebidos para o ensino de determinadas disciplinas e tópicos em um determinado nível, a variedade de materiais instrucionais disponíveis em relação a esses programas, e o conjunto de características que servem como indicações e contra-indicações para o uso de determinados currículos ou de materiais do currículo em circunstâncias específicas (SHULMAN, 1986, p. 7, tradução nossa).

⁷ Tradução livre. Texto original: “[...] an understanding of what makes the learning of specific topics easy or difficult: the conceptions and preconceptions that students of different ages and backgrounds bring with them to the learning of those most frequently taught topics and lessons [...]”.

De acordo com Shulman (1886), o conhecimento do conteúdo da matéria a ser ensinada (primeira categoria apresentada por Shulman) é de extrema importância para que o professor possa realizar julgamentos pedagógicos a respeito do currículo. Na concepção de Fiorentini, Souza Junior e Melo (2003) o conhecimento curricular

[...] diz respeito ao currículo específico e conexo à(s) disciplina (s) que ensina e compreende a organização e estruturação dos conhecimentos escolares e aos seus respectivos materiais (livros- texto, propostas curriculares, e todo tipo de material instrucional, como jogos pedagógicos, materiais para manipulação, vídeos, softwares, CD-ROMs etc) (FIORENTINI; SOUZA JUNIOR; MELO, 2003, p. 317).

Em seu trabalho posterior intitulado *“Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform”*⁸, Shulman (1987) apresenta uma revisão a respeito das três categorias apresentadas, sem mudar a essência de seu trabalho anterior. Entretanto os conhecimentos necessários para a “base de conhecimentos” da profissão docente são apresentados com maiores detalhes, incluindo além dos conhecimentos discutidos em seu trabalho anterior, aspectos relacionados aos saberes da experiência e aos saberes relacionados aos alunos (ARAMAN, 2011, SHULMAN, 1987).

Dessa forma, Shulman (1987) acrescenta mais 4 categorias, além das apresentadas em seu trabalho anterior, as chamadas *“Categories of the Knowledge Base”* (Categorias da base de conhecimentos), no qual os conhecimentos que um professor mobiliza durante sua prática docente deve incluir:

- O conhecimento do conteúdo da matéria a ser ensinada: Como dito anteriormente corresponde a compreensão que o professor tem a respeito dos conceitos e da estrutura da disciplina que leciona.
- Conhecimento pedagógico geral: diz respeito ao conhecimento de princípios e estratégias gerais para que o professor possa gerenciar e organizar a sala de aula.
- Conhecimento do currículo: Como explicitado anteriormente, esse conhecimento diz respeito ao conhecimento que o professor deve ter a respeito da estrutura curricular e seus respectivos materiais.
- Conhecimento pedagógico do conteúdo: Corresponde ao amalgama entre o conteúdo e as práticas pedagógicas, a maneira como o professor ensina e o torna compreensível aos estudantes.

⁸ Tradução livre: “Conhecimento e Ensino: Fundamentos de uma Nova Reforma”.

- Conhecimentos dos estudantes e suas características: Se relaciona aos conhecimentos dos processos de ensino e aprendizagem, com a finalidade de compreender os processos cognitivos dos aprendizes.
- Conhecimento do contexto educacional: Corresponde ao conhecimento do contexto real da sala de aula, as características da comunidade escolar e suas idiossincrasias.
- Conhecimento dos fins educacionais: Diz respeito aos valores e propósitos educacionais e suas respectivas bases filosóficas e históricas.

Três décadas após a introdução do conceito de Conhecimento Pedagógico do Conteúdo, Shulman (2015) aponta para algumas limitações em relação a sua formulação original, proposta em seus trabalhos anteriores. O autor ressalta que a formulação das suas categorias originais dentre elas o conhecimento pedagógico do conteúdo, se originou em resposta ao ponto de vista predominante na época que considerava o ensino como um processo sem conteúdo e os professores como atores qualificados desprovidos de emoções e carreiras (SHULMAN, 2015).

A primeira limitação relacionada ao conhecimento pedagógico do conteúdo citada pelo autor, se refere a desconsideração de fatores não cognitivos, como as emoções os sentimentos e motivações. Segundo ele, estava tão decidido em combater o chamado “paradigma perdido” que não dedicou a devida atenção a esses aspectos (SHULMAN, 2015; SILVA; MARTINS, 2018). Segundo ele

Os aspectos afetivos da compreensão e ação dos professores são importantes tanto porque muito do que os professores "sabem e fazem" está ligado aos seus próprios estados afetivos e de motivação, como à sua capacidade de influenciar os sentimentos, motivos, persistência, e identificar o processo de formação dos seus alunos. Tudo isto está também relacionado com a sua visão normativa do tipo de mundo para o qual aspiram a contribuir como educadores profissionais e cidadãos na sociedade democrática (SHULMAN, 2015, p. 9).

Apresenta também como limitações a falta de atenção dada a ação pedagógica em si e às questões do contexto social e cultural. Argumenta que o conhecimento pedagógico do conteúdo necessita dar ênfase aos aspectos não cognitivos acima citados, mas não pode ignorar o papel da ação na prática pedagógica. E, “a cultura e o contexto são enormes invólucros dentro dos quais encontramos muitos dos determinantes do ensino-aprendizagem” (SHULMAN, 2015, p. 10).

Os estudos de Shulman (1986, 1987) a respeito da base de conhecimentos necessária para a profissão docente, assim como os trabalhos posteriores a esse respeito, contribuem para encaminhar e estruturar as questões relacionadas aos

Saberes Docentes.

1.3 REPERTÓRIO DE CONHECIMENTOS NECESSÁRIO PARA A PRÁTICA DOCENTE

Os estudos apresentados no trabalho de Gauthier e colaboradores (1998), os autores propõem apresentar uma contribuição a respeito do repertório de conhecimentos necessários para o ensino, por meio de sínteses de pesquisas empíricas e de reflexões a respeito do ensino, objetivando o esboço de uma teoria geral da pedagogia. Na concepção de Almeida e Biajone (2007)

[...] as contribuições de Gauthier e colaboradores (1998), que realizaram estudos das pesquisas sobre o ensino no intuito de identificar convergências em relação aos saberes mobilizados na ação pedagógica e com o objetivo de examinar as implicações, formular problemáticas, avaliar resultados e esboçar uma teoria geral da pedagogia (ALMEIDA, BIAJONE, 2007, p. 284).

Gauthier *et. al.* (1998), logo na apresentação de seu trabalho, afirma que mesmo que o ofício de ensinar possua uma longa história, ainda se conhece muito pouco, ou menos que o desejado, a respeito da influência dos atos do professor na aprendizagem dos alunos e relativo aos saberes docentes. Para os autores “o conhecimento desses elementos do saber profissional docente é fundamental e pode permitir que os professores exerçam seu ofício com muito mais competência” (GAUTHIER *et al.*, 1998, p. 17).

A fim de demonstrar a relevância de estabelecer e definir um repertório de conhecimentos para a prática docente⁹, os autores apresentam a sentença “conhece-te a ti mesmo” do oráculo de Delfos. Dessa a forma a definição e estruturação de um repertório de conhecimentos pode contribuir para que o docente desenvolva sua identidade profissional e se reconheça como docente (GAUTHIER *et. al.*, 1998).

Embora seja impossível determinar em definitivo todos os constituintes do repertório de conhecimentos docentes, é essencial o trabalho de pesquisas que proporcionam reflexões desses aspectos, pois de acordo com os autores o “trabalho de pesquisa e de reflexão surge como uma necessidade, pois constitui uma condição

⁹ Gauthier *et. al.* enfatizam que o termo “repertório de conhecimentos” é geralmente encontrado na língua inglesa como “knowledge base”, porém a última é empregada em um sentido mais amplo, podendo contemplar todos os saberes docentes. Nesse momento os autores fazem menção as categorias propostas por Shulman (1987), e enfatizam que o termo “repertório de conhecimentos” citado no trabalho designará os chamados “saberes da ação pedagógica” e dizem respeito diretamente aos resultados de pesquisas empíricas realizadas em sala de aula. Desse modo, para os autores o termo “repertório de conhecimentos” representa um subconjunto do reservatório de conhecimentos gerais do professor (Knowledge base).

fundamental para a profissionalização do ensino” (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p.19).

Além de fundamental para o processo de profissionalização da profissão docente, as pesquisas desenvolvidas a respeito de um repertório de conhecimentos para o ensino, possibilitaria o contorno de dois obstáculos que sempre estiveram presentes no campo da Pedagogia, a saber: o de um ofício sem saberes, e saberes sem ofício.

O obstáculo relacionado a um ofício sem saberes, diz respeito a atividade docente desempenhada sem o conhecimento dos saberes intrínsecos a ela. Novamente, os autores colocam em relevo a necessidade de desenvolver um corpus de saberes para a profissionalização da atividade docente. O autor pontua ainda que “ao contrário de vários outros ofícios que desenvolveram um *corpus* de saberes, o ensino tarda a refletir sobre si mesmo” (GAUTHIER *et al.*, 1998, p.20). A falta de conhecimento a respeito dos saberes docentes, pode manter certas ideias provenientes do “senso comum” a respeito da prática docente.

Uma dessas ideias é a que considera que para ensinar basta conhecer o conteúdo, mesmo que o conhecimento do conteúdo seja parte integrante dos saberes que o professor deve ter, ela é insuficiente. De acordo com Gauthier *et. al.* (1998) para o ensino também é necessário planejamento, organizar atividades, avaliar, se atentar ao comportamento dos alunos entre outros. Dessa forma

Pensar que ensinar consiste apenas em transmitir um conteúdo a um grupo de alunos é reduzir uma atividade tão complexa quanto o ensino a uma única dimensão, aquela que é mais evidente, mas é sobretudo negar-se a refletir de forma mais profunda sobre a natureza desse ofício e dos outros saberes que lhe são necessários. Numa palavra, o saber do *magister* não se resume ao conhecimento da matéria (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p. 20-21).

Outra ideia citada pelos autores é aquela que concebe que para ensinar basta ter talento, os autores pontuam que o talento é essencial para toda a profissão, mas novamente não pode se reduzir a esse aspecto, pois o trabalho e a reflexão também são fatores primordiais. Se limitar a presença de talento pode contribuir para que os profissionais desconsiderem as contribuições dos resultados de pesquisas, e dessa forma limitar a possibilidade de melhorar sua atuação (GAUTHIER *et. al.*, 1998).

É recorrente também a ideia de que para ensinar basta ter bom senso, essa concepção, supõe que o “bom” senso é algo compartilhados por todos e que existe apenas um único senso. Porém, sabemos que essa concepção não condiz com a realidade pois, de acordo com os autores o senso é plural, heterogêneo e varia de

acordo com as perspectivas de cada indivíduo e, portanto, há inúmera variações do senso, por esse motivo

[...] visto que a educação é o lugar por excelência dos conflitos de valor e de perspectiva, visto que ela é o centro de nossas angústias coletivas, clamar pelo bom senso é forjar uma quimera, é querer um mundo unitário que não existe, que talvez nunca tenha existido ou que no mínimo, não mais existirá (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p.22).

Além disso, ao reduzir a profissão docente ao “bom senso” além de negar a heterogeneidade presente na escola e na sala de aula, negamos também a existência de um conjunto de conhecimentos e habilidades necessários para o exercício da profissão (GAUTHIER *et. al.*, 1998).

Outra ideia relacionada ao ensino, é a que considera que para ensinar basta seguir a intuição que segundo, os autores (GAUTHIER *et. al.*, 1998) essa concepção sugere a negação dos saberes e a reflexão a respeito deles, e o abandono de todo o senso crítico. Os autores pontuam também, que essa concepção impede o ensino de se expressar e de estabelecer uma relação de reflexão (preferencialmente contínua) a respeito dos saberes docentes.

Uma outra ideia frequentemente disseminada, é a que considera que basta ter experiência para ensinar, que “se aprende a ensinar, ensinando”. Por mais que o saber experiencial, seja um integrante importante no ensino

[...] esse saber experiencial não pode representar a totalidade do saber docente. Ele precisa ser alimentado, orientado por um conhecimento anterior mais formal que pode servir de apoio para interpretar os acontecimentos presentes e inventar soluções novas. Por conseguinte, em sua prática, o docente não pode adquirir tudo por experiência. Ele deve possuir também um corpus de conhecimentos que o ajudarão a “ler” a realidade e a enfrentá-la. (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p.24).

Basear a atividade docente apenas aos saberes experienciais, também desconsidera a existência de um corpo de saberes inerentes a profissão, por isso, ao considerar apenas essa concepção negamos ou até mesmo impedimos, a profissionalização da docência visto que se reconhece uma profissão por meio de um conjunto específico de saberes formalizados para o seu exercício (GAUTHIER *et al.*, 1998).

A última ideia apresentada pelos autores, é a ideia de que para ensinar basta ter cultura. Os autores destacam que ter cultura é essencial para a prática docente, mas que ela por si só, não garante que se ensine bem. Por esse motivo “tomá-lo como exclusivo é mais uma vez contribuir para manter o ensino na ignorância” (GAUTHIER

et al, 1998, p. 25).

Essas ideias preconcebidas a respeito do ensino, de maneira geral, prejudicam o processo de profissionalização do ensino, por desconsiderar a necessidade de estruturação e compreensão dos saberes necessários para a atuação docente e conseqüentemente dificultam o seu processo de profissionalização, reforçando dessa forma “a perpetuação de um ofício sem saberes” (ALMEIDA; BIAJONE, 2007, p. 284).

O segundo obstáculo apresentado por Gauthier et. al. (1998) é o que denominam saberes sem ofício. Esse obstáculo se refere a tentativa de formalizar os saberes relativos ao ensino, realizados por pesquisas que reduzem o ensino de forma a reduzir sua complexidade e que assim não condizem com a realidade. Segundo Almeida e Biajone (2007) os saberes sem ofício “tem sua origem nas Ciências da Educação, ou seja, são conhecimentos produzidos nos centros acadêmicos” (ALMEIDA; BIAJONE, 2007, p.284).

Da mesma forma, que o obstáculo relacionado ao ofício sem saberes pode dificultar o processo de profissionalização do ensino, a tentativa de superação desse obstáculo pode levar ao outro extremo de saberes sem ofício, que se torna igualmente ineficaz. De acordo com os autores

Esse fracasso do projeto da ciência da educação também contribuiu para desprofissionalizar a atividade docente, ao reforçar nos professores a idéia de que a pesquisa universitária não lhes podia fornecer nada de realmente útil, e que, conseqüentemente, era muito mais pertinente que uns continuassem se apoiando na experiência pessoal, outros na intuição, outro no bom senso, etc (GAUTHIER et al, 1998, p. 27, grifo nosso).

Como visto, os dois obstáculos, tanto o ofício sem saberes quanto os saberes sem ofício podem impedir a compreensão e a estruturação de um corpo de saberes inerentes a educação, por esse motivo, de acordo com os autores é preciso evitar esses dois obstáculos. A fim de evitar os erros citados, Gauthier et al (1998) propõem o que denominam um *ofício feito de saberes*. Para isso “é muito mais pertinente conceber o ensino como a mobilização de vários saberes que formam uma espécie de reservatório no qual o professor se abastece para responder a exigências específicas de sua situação concreta de ensino” (GAUTHIER et al, 1998, p. 28).

Esse reservatório de conhecimentos, como denominado pelos autores (GAUTHIER et al, 1998), é constituído por seis tipologias de saberes: os saberes disciplinares, os saberes curriculares, os saberes das ciências da educação, os saberes da tradição pedagógica, os saberes experienciais e por fim os saberes da

ação pedagógica.

Os saberes disciplinares são aqueles produzidos por pesquisadores e cientistas de determinadas áreas do conhecimento, o professor não produz esse tipo de saber, mas precisa se apropriar dele. Gauthier *et. al.* (1998) enfatizam a exigência de conhecer o conteúdo da disciplina ou área que o professor leciona, esse conhecimento, porém não deve ser apenas sintético, e dessa forma dominar o conteúdo da disciplina que leciona pode assumir distintos significados, segundo os autores

O que quer dizer “conhecer a matéria”, para um professor, num contexto real de ensino? Será que ele precisa conhecer a estruturada disciplina, isto é, os conceitos fundamentais e o método relativo a uma disciplina, por exemplo a química? Será que deve conhecer também a história dessa disciplina, o contexto e a ordem de surgimento de determinados conceitos? (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p. 29- 30, grifo nosso).

Portanto, assim como comentamos anteriormente, o conhecimento do conteúdo da disciplina não deve se reduzir ao conhecimento de proposições e conceitos, mas deve integrar também conhecimentos históricos e epistemológicos a respeito dos mesmos, levando em conta que o tipo de conhecimento que o professor possui de sua disciplina influencia diretamente no processo de ensino e de aprendizagem de seus alunos (GAUTHIER *et al*, 1998).

Outro tipo de saber destacado pelos autores é o saber disciplinar. Esse tipo de saber se refere ao conhecimento que o professor deve possuir a respeito do currículo, pois “uma disciplina nunca é ensinada tal qual, ela sofre inúmeras transformações para se tornar um programa de ensino” (GAUTHIER *et al*, 1998, p. 30). Esse conhecimento é necessário pois é a partir dele que o professor estrutura suas atividades e materiais e transformar o programa de acordo com seus critérios.

O saber das ciências da educação refere-se ao saber adquirido, pelo professor, durante a sua formação, por exemplo, noções a respeito do sistema escolar, do desenvolvimento de crianças, classes sociais, diversidade cultural entre outras. Dessa forma, consiste em

[...] um saber profissional específico que não está diretamente relacionado com a ação pedagógica, mas serve de pano de fundo tanto para ele quanto para os outros membros de sua categoria socializados da mesma maneira. Esse tipo de saber permeia a maneira de o professor existir profissionalmente (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p. 31).

O saber da tradição pedagógica, está relacionado com a percepção do professor a respeito da docência e da escola concebidas anteriormente a sua

formação na universidade. Essas concepções se instauram ao decorrer da vida do professor de acordo com suas experiências e vivências. O conhecimento e tomada de consciência relacionados a esse aspecto proporciona ao professor a transformação dessas concepções embasadas pelo saber experiencial ou pelo saber da ação pedagógica (GAUTHIER et al, 1998).

O saber experiencial, é o tipo de saber desenvolvido a partir da experiência e vivências pessoais, elas, por sua vez vão sendo registradas no repertório de saberes do professor. Mesmo que o professor vivencie muitas experiências e se beneficie delas, essas permanecem confinadas à sala de aula. Dessa forma “o professor pode ter experiência e dar explicações errôneas para justificar sua maneira de agir” (GAUTHIER et al, 1998, p. 33). Esse fato salienta a fragilidade de que o saber experiencial, é constituído de pressupostos e argumentos não validados.

Por fim, o saber da ação pedagógica é o saber experiencial do professor, quando este se torna público e testado por meio de pesquisas realizadas no contexto da sala de aula. Segundo Gauthier et al (1998) o saber do professor, na maioria das vezes, é privado e não é submetido a nenhum processo de comprovação sistemática, dessa forma cada professor por si só, cria uma jurisprudência particular, que acreditam funcionar ou eventualmente de fato funcionam. O fato é que

[...] embora presente em toda a prática profissional, uma jurisprudência particular não tem nenhuma utilidade para a formação de professores e não leva a um maior reconhecimento do status profissional dos docentes. Via de regra, esse saber se perde quando o professor deixa de exercer seu ofício. Os resultados das pesquisas sobre o saber da ação pedagógica poderiam contribuir enormemente para o aperfeiçoamento da prática docente (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p. 34).

Apesar de sua grande relevância para formação de professores e profissionalização da prática docente, as pesquisas a respeito dos saberes da ação pedagógica são, segundo Gauthier *et. al.* (1998), os menos desenvolvidos em pesquisas a respeito do reservatório de saberes do professor. Na ausência de um saber pedagógico validado por pesquisas no contexto de sala de aula o professor continuará a fundamentar seus gestos e ações em sala de aula baseado no “senso comum” que podem conter limitações e implicações importantes, dentre eles desprofissionalizar a docência.

Os estudos de Gauthier *et. al.* (1998) visam tentar revelar, compreender a natureza, os componentes e o funcionamento do repertório de conhecimentos próprio ao ensino, com objetivo específico de explicitar o saber da ação pedagógica, saber

constituente do repertório de conhecimentos. Ainda, segundo os autores a determinação, o reconhecimento e sistematização de um repertório de conhecimentos da docência é uma árdua tarefa que necessita de pesquisas que fundamentem a ação do professor cientificamente, por meio de pesquisas que concebam

[...] o trabalho do professor como o de um profissional, ou seja, como o daquele que, munido de saberes e confrontado a uma situação complexa que resiste à simples aplicação dos saberes para resolver a situação, deve deliberar, julgar e decidir com relação à ação a ser adotada, ao gesto a ser feito ou à palavra a ser pronunciada antes, durante e após o ato pedagógico. (GAUTHIER *et. al.*, 1998, p. 331).

De acordo com os autores, as pesquisas relacionadas aos saberes docentes, no contexto de sala de aula, objetivando explicitar e compreender o repertório de conhecimentos específicos da prática docente, são de extrema importância tanto para a formação de professores quanto para a profissionalização da atividade docente.

1.4 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E ASPECTOS DA NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO E A FORMAÇÃO DE PROFESSORES

Como citado acima, autores como Shulman (1986,1987) e Gauthier (1998) indicam a necessidade do conhecimento histórico e epistemológico como parte integrante de uma base ou repertório de conhecimentos necessários para a formação docente. De acordo com Matthews (1995) um professor que tenha conhecimento histórico e epistemológico de sua disciplina pode promover um ensino de melhor qualidade, mesmo que ele não utilize esses conhecimentos diretamente, pois “há mais em um professor do que aquilo que se pode ver em sala de aula” (MATTHEWS, 1995, p. 188).

Seguindo essa mesma linha de pensamento, Carvalho e Gil- Pérez (2011) em sua obra a respeito da formação de professores Ciências, argumentam que o conhecimento do conteúdo científico da disciplina ensinada é essencial para o exercício da prática docente. A importância do conhecimento do conteúdo científico parece evidente, já que os cursos de formação de professores de Ciências frequentemente se resumem ao conteúdo. Geralmente admite-se implicitamente que a preparação em relação aos conteúdos científicos fornecida durante a formação inicial é suficiente, desconsiderando as atividades de formação continuada. No entanto, em consonância com resultados de investigações, a preparação fornecida durante a formação inicial não é suficiente, e argumentam que

[...] *uma falta de conhecimentos científicos constitui a principal dificuldade para que os professores afetados se envolvam em atividades inovadoras.* Todos os trabalhos investigativos existentes mostram a gravidade de uma carência de conhecimentos da matéria, o que transforma o professor em um transmissor mecânico dos conteúdos do livro texto (CARVALHO; GIL-PÉREZ, 2011, p. 22).

Assim, de acordo com Carvalho e Gil-Pérez (2011), é preciso dar ênfase ao fato de que o aspecto do conhecimento do conteúdo científico apesar de aparentemente evidente, implica em diversos conhecimentos profissionais que incluem o conhecimento a respeito da História da Ciência, principalmente dos problemas epistemológicos. Conhecer os problemas que originaram a construção de determinado conhecimento científico pode fornecer aos professores subsídios para relacioná-lo ao ensino, evitando assim apresentar os conteúdos como construções arbitrárias que podem disseminar ou reforçar visões lineares e dogmáticas a respeito da Natureza do Conhecimento Científico (CARVALHO, GIL-PÉREZ, 2011). Assim,

[...] o aluno/professor que é estimulado a pensar mediante uma *estrutura* epistemológico- cognitiva relacionada a um dado conteúdo estará mais apto a explicar quaisquer proposições, conceituações, de maneira *articulada*, integrada e a desenvolver, por meio de sua própria crítica, uma visão ampliada e consistente da atividade científica (BATISTA, 2004, p. 473).

É importante destacar que docentes e futuros docentes (formação inicial) também podem possuir concepções ingênuas e inadequadas da Natureza da Conhecimento Científico (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001). Assim, é necessário que a HFC e aspectos relacionados a Natureza do Conhecimento Científico sejam inseridos nos cursos de formação de professores (inicial e continuada) podendo contribuir para a efetiva inserção da HFC no Ensino de Ciências pois “o contato com as vantagens e desafios que envolvem a interface gerada entre essas duas áreas pode influenciar uma mudança de postura dos futuros docentes frente a estratégias de ensino inovadoras” (SILVA; TEIXEIRA; PENIDO, 2018, p.788).

Assim a inserção desses aspectos, a outros níveis educacionais ocorreria por meio de “efeito multiplicador” ou “efeito cascata”, ou seja, professores com formação adequada estariam aptos a utilizar abordagens utilizando HFC na educação básica (MARTINS, 2006; SILVA; TEIXEIRA; PENIDO, 2018).

Dessa forma é necessário que professores de Ciências tenham domínio do contexto histórico, de conceitos e ideias da Ciência que ensina, ter um conhecimento razoavelmente sólido a respeito de terminologias como: “lei”, “modelo”, “teorias”, “hipóteses” e reconhecer os seus papéis metodológicos na construção do conhecimento científico. O professor deve conhecer o processo de evolução e

construção do conhecimento científico para que seja capaz de discutir a respeito dele e integrá-los em sua práxis profissional. (MATTHEWS, 1995; CARVALHO; GIL PÉREZ, 2011).

Considerando as potencialidades já citadas em favor da inserção da HFC no Ensino de Ciências, para que seja possível a inserção efetiva da HFC no ensino de Ciências, é indispensável que o professor seja capacitado e habilitado para abordar tais temas de maneira responsável. Sendo assim, torna-se visível também a importância da inserção da História e Filosofia da Ciência na formação dos professores de Ciências. Portanto a História e Filosofia da Ciência torna-se uma necessidade formativa do professor. (MATTHEWS, 1995; MARTINS, 2007; CARVALHO; GIL PÉREZ, 2011, PEREIRA; MARTINS, 2011).

1.5 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE FÍSICA

A importância do ensino da Física Moderna e Contemporânea, no Ensino Médio é incontestável. Diversos trabalhos e pesquisas realizadas na área de Ensino de Ciências evidenciam esse fato. Os argumentos usados para justificar o ensino de Física Moderna no Ensino Médio são diversos, de acordo com Terrazzan (1992) o ensino de Física Moderna torna-se imprescindível visto que aparelhos atuais e fenômenos do cotidiano, em grande parte, são compreendidos apenas utilizando conceitos instituídos na virada do século XX. O autor enfatiza também que “a Física desenvolvida na escola de 2º grau deve permitir aos estudantes pensar e interpretar o mundo que os cerca” (TERRAZZAN, 1992, p. 213).

O cotidiano no qual o estudante está inserido assume papel fundamental na definição dos conteúdos relevantes e potencialmente significativos a serem ensinados (TERRAZZAN, 1992). Há uma grande defasagem entre os conteúdos ensinados nas aulas de Física do Ensino Médio e os avanços científicos atuais (TERRAZZAN, 1992; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007) e por essa razão,

A lacuna provocada por um currículo de física desatualizado resulta numa prática pedagógica desvinculada e descontextualizada da realidade do aluno. Isso não permite que ele compreenda qual a necessidade de se estudar essa disciplina que, na maioria dos casos, se resume em aulas baseadas em fórmula e equações matemáticas, excluindo o papel histórico, cultural e social que a física desempenha no mundo em que vive (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007, p.448).

Essa descontextualização, além de dificultar o processo de aprendizagem e

construção de conhecimentos físicos, se torna ainda mais preocupante quando consideramos a sua influência na formação científica dos estudantes. Em muitos casos, o período escolar (do Ensino Médio) é o único contato formal que os estudantes terão com a Física e outras Ciências, assim uma formação científica ineficaz influencia negativamente a formação científica esperada, de cidadãos que compreendam a ciência como um empreendimento humano, influenciado pelo seu contexto histórico e social e a influência do conhecimento científico na sociedade em que vivem (PINTO; ZANETIC, 1999; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007).

É crescente o número de pesquisas que destacam as diversas razões favoráveis a inserção do ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, entre esses tópicos enfatizaremos a Física Quântica. Dentre as contribuições que o ensino desses tópicos pode trazer ao ensino básico, citamos: sua potencialidade para instigar a curiosidade dos estudantes e aproximá-los da Física atual; podem proporcionar aos estudantes a construção de uma concepção adequada em relação a Natureza do Conhecimento Científico, superando concepções errôneas como a perspectiva de que o desenvolvimento científico se faz de maneira linear e cumulativa; pode proporcionar que os estudantes mantenham o interesse e entusiasmo pela Física, sendo assim atraídos para a carreiras científicas (OSTERMANN; MOREIRA, 2000; OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO; 2009; SILVA; ALMEIDA, 2011).

Outra justificativa apresentada para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio está relacionada com a consonância entre as contribuições do ensino de tópicos de Física Moderna com os objetivos educacionais presentes nas legislações. De acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) - Ensino Médio e com as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) o ensino de no Ensino Médio visa formar um cidadão capaz de compreender, intervir e participar da realidade em que está inserido. O estudante deve ser capaz de reconhecer a Física como um processo de construção, que ocorreu ao longo da história, permeado por questões e interferências de âmbito cultural, econômico e social (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007). De acordo com os PCN+

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria [...]. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas (BRASIL,

2002, p.70).

A Física Quântica é uma componente emblemática e importante da Física Contemporânea, contendo um dos principais desenvolvimentos teóricos e mudanças de paradigmas da Física Contemporânea. Além disso é base de diversas inovações tecnológicas e é um símbolo de “Ciência legal” na cultura popular (Johansson *et. al.* 2018). Dessa forma, levando em consideração a educação científica almejada,

[...] não deveríamos esquecer que uma educação científica responsável deve ir além da preparação efetiva de futuros cientistas e técnicos e ajudar os estudantes a compreender como a ciência se relaciona com toda a cultura, dar-lhes o conhecimento suficiente para participar da cultura científica quando seja necessário e oferecer-lhes a oportunidade de pensar sobre as implicações filosóficas derivadas da Física moderna, questões que passam, umas e outras, por uma apropriada compreensão conceitual da MQ (GRECA; FREIRE JR., 2011, p. 360).

Em um trabalho realizado com professores de Física atuantes no Ensino Médio, Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007) investigaram as opiniões desses professores a respeito da introdução de tópicos do Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Como resultado, os professores apontaram como principais dificuldades da introdução da Física Moderna a falta de tempo e a necessidade de abordar os conteúdos cobrados nos exames vestibulares. Também indicaram a matematização dos conteúdos de Física Moderna como um problema, e dessa forma trabalhariam apenas com os aspectos conceituais referentes a esses tópicos. A falta de material didático adequado e a necessidade de capacitações ou formações continuadas também foram citadas (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007).

Em uma outra investigação com professores de Física, Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) buscaram identificar os obstáculos enfrentados por esses professores na inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio e sua relação com a formação inicial. Por meio de entrevistas, os pesquisadores puderam constatar que apesar dos professores considerarem sua formação, em relação a Física Moderna e Contemporânea, satisfatória não demonstram autonomia em relação ao seu ensino (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO; 2009).

De acordo com os autores essa falta de autonomia está diretamente relacionada com o padrão de abordagens presente na formação inicial desses professores. A ênfase dada nas disciplinas ministradas nos cursos de licenciatura, incluindo as disciplinas de Física Moderna e Física Quântica, é em sua maior parte, instrumentalista no qual o objetivo é a aprendizagem tecnicista das teorias e posteriormente na resolução de problemas. Essa abordagem pode acarretar ao

licenciando um conhecimento superficial e gerar dificuldades conceituais e de interpretação (NETTO; CAVALCANTI; OSTERMANN, 2019; JOHANSSON *et. al.*, 2018; MOTA, 2000, MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO; 2009).

De acordo com Batista (2004) é frequente que alunos do ensino superior, apesar de reproduzirem tecnicamente leis físicas, apresentam erros conceituais em exercícios e discussões mais aprofundadas dos conceitos envolvidos em tal lei. A partir disso é possível constatar que esses alunos não assimilaram todo o seu significado. Portanto,

Isso significa que saber apresentar e operacionalizar o enunciado de uma lei não é, segundo uma formação que permite uma evolução escolar desse tipo, saber estabelecer as relações ente conceitos e atingir um todo conceitual. Dessa forma os alunos não percebem a estrutura teórico- conceitual formada por conceitos, leis e princípios, que explica determinado fenômeno (BATISTA, 2004, p.463).

Dessa forma, é extremamente importante que os licenciandos tenham em seus cursos de graduação uma aprendizagem significativa a respeito dos conceitos e teorias da disciplina que futuramente atuará como docente. Esse argumento vai ao encontro da Resolução CNE/CP 2/2019 que define as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) para a Formação inicial em Nível Superior de Professores da Educação Básica e estabelece a Base Nacional Comum para a Formação Inicial de Professores para a Educação Básica (BNC- Formação) (BRASIL, 2020).

A BNC- Formação toma como referência a implementação da BNCC- Educação Básica, e pressupõe que o licenciando desenvolva as competências gerais docentes e específicas compondo a BNC- Formação. Dentre as competências específicas presentes nesse documento destacamos a competência relacionada ao Conhecimento Profissional “1.1 Dominar os objetivos de conhecimentos e saber como ensiná-los” em que de acordo com o referido documento, se espera que o licenciando desenvolva a habilidade de,

1.1.1 Demonstrar conhecimento e compreensão dos conceitos, princípios e estruturas da área da docência, do conteúdo, da etapa, do componente e da área de conhecimento no qual está sendo habilitado a ensinar (BRASIL, 2020, p. 15)

Considerando a relevância dos argumentos apresentados acima, a atualização e a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, está diretamente ligada a formação inicial e continuada de professores (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007; SILVA; ALMEIDA, 2011). Para isso é preciso debater a respeito das dificuldades presentes na formação dos professores de Física, que podem

comprometer sua prática docente.

Para que a Física Moderna e Contemporânea seja inserida no Ensino Médio, é fundamental a discussão de outras perspectivas para a formação de professores de Física (MONTEIRO; NARDI; BASTOS, 2009; SILVA; ALMEIDA, 2011). Dessa forma, “é fundamental preparar adequadamente os futuros professores para essa complexa tarefa de inovação curricular se o objetivo é implementá-la nas escolas”. (OSTERMANN; MOREIRA, 2001, p.146).

Greca e Freire Jr. (2011) argumentam que diversas propostas didáticas surgiram como alternativa para alcançar os objetivos referentes a uma educação científica esperada. Enfatizamos as propostas direcionadas aos cursos universitários de formação de professores com enfoque em discussões conceituais e históricas e/ou filosóficas visando proporcionar aos futuros docentes uma compreensão conceitual dos fundamentos da Física Quântica (GRECA; FREIRE JR., 2011).

No capítulo seguinte abordamos as potencialidades e contribuições do conhecimento a respeito de aspectos da História e Filosofia da Ciência (HFC) e sua influência no Ensino de Ciências e na formação inicial de professores.

2 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS

A inserção de aspectos de HFC no Ensino de Ciências é um assunto que vem sendo amplamente discutido na literatura. O uso de abordagens histórico-filosóficas, como uma abordagem didática, não resolve todos os problemas educacionais, mas trazem diversas contribuições e pode enriquecê-lo de diversas maneiras (MATTHEWS, 1995; MARTINS, 2006; MARTINS, 2007; DRUMMOND *et. al.*, 2015)

O uso de abordagens que integram História, Filosofia e Sociologia da Ciência ao ensino de Ciências pode favorecer a compreensão da interrelação entre Ciência, Tecnologia e Sociedade, contribuindo dessa forma para um entendimento mais adequado a respeito de aspectos relacionados a Natureza do Conhecimento Científico. Essas abordagens contribuem também para a percepção do desenvolvimento do conhecimento científico como uma construção humana coletiva/ colaborativa, processual e influenciada pelo meio histórico e social no qual estava inserida (MATTHEWS, 1995; MARTINS, 2006; GIL-PÉREZ *et al*, 2001; DRUMMOND *et. al.*, 2015).

Além das contribuições expressas acima, a inserção de HFC no Ensino de Ciências contribui para a chamada “humanização das ciências” no que diz respeito a aproximar o aprendiz do processo científico, desmistificando a figura de cientistas como gênios isolados e concebendo a figura de cientista como uma pessoa comum, considerando seus interesses pessoais, éticos, culturais e políticos. Tem ainda a potencialidade de tornar as aulas de ciências mais interessantes e desafiadoras propiciando o desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes, e desse modo pode contribuir para um entendimento completo do conteúdo científico e do processo de construção de conhecimentos (MATTHEWS, 1995; BATISTA, 2004, 2007; MARTINS, 2007; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011; DRUMMOND *et. al.*, 2015; MONTEIRO; MARTINS, 2015; HIDALGO; SCHIVANI; SILVA, 2018).

Dessa forma é possível contornar o problema do “mar de falta de significação” enfrentado pelos aprendizes. Esse problema se deve ao fato de as aulas de ciências serem ministradas majoritariamente de forma axiomática repleta de equações matemáticas, deixando de lado discussões conceituais ou epistemológicas a respeito de seus significados (MATTHEWS, 1995; BATISTA, 2007). Batista (2004), em uma investigação a respeito das dificuldades específicas no ensino de Física, relacionada a compreensão de conceitos científicos, pontua que se pode perceber que estudantes

apesar de saberem enunciar e operacionalizar uma determinada lei da Física não compreendem todo o seu significado. Dessa forma,

A redução da Física a pura técnica, em certos casos; à técnica experimental e, em outros à técnica matemática para a dedução lógica de consequências dos axiomas da teoria, evita questionamentos conceituais no seu ensino e gera uma formação limitada, estreita e acrítica. Assim, a investigação e o ensino da Física não devem ignorar simetricamente os avanços e os contrastes históricos que deram origem às ideias científicas atuais (BATISTA, 2004, p.463).

Assim levar em consideração a História e os problemas epistemológicos (problemas motivadores) de um determinado conteúdo, permite uma maior compreensão do processo de elaboração dos conceitos, modelos e teorias e conseqüentemente auxilia na aprendizagem dos conteúdos científicos (BATISTA, 2004, 2007; MARTINS, 2006; DRUMMOND *et. al.*, 2015). A integração da HFC no ensino pode ainda evitar ou minimizar possíveis concepções epistemológicas inadequadas (em sua grande maioria ingênuas) a respeito da Natureza do Conhecimento Científico (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; DRUMMOND *et. al.*, 2015). Nas palavras de Martins (2006), “o estudo histórico de como um cientista realmente desenvolveu sua pesquisa ensina mais sobre o real processo científico do que qualquer manual de metodologia científica” (MARTINS, 2006, p. XXIII).

A inserção da HFC no ensino de Ciências pode proporcionar também o conhecimento de possíveis concepções alternativas de estudantes, visto que algumas das concepções alternativas apresentadas, em sua maioria ingênuas e intuitivas, se assemelham a concepções científicas defendidas no passado, durante o processo de elaboração de conceitos ou teorias (MATTHEWS, 1995; MONTEIRO; MARTINS, 2015). O estudo de exemplares históricos, segundo esse argumento, pode subsidiar melhorias no ensino como fontes de noções alternativas (conflitantes ou não) de explicações e conceitos (BATISTA, 2004).

As noções alternativas (ou prévias), trazidas pelos estudantes não devem ser ignoradas, mas sim reconhecidas e gradativamente transformadas em um perfil conceitual condizente com o perfil conceitual aceito pela comunidade científica. Para que se alcance esse objetivo é necessário que se utilize de novas estratégias, e é aconselhável que o professor conheça as noções alternativas dos estudantes, tentando tratá-las com respeito, não as ridicularizar e auxiliar que o estudante passe por um processo de mudança de perfil conceitual. Nesse sentido conhecer aspectos da HFC pode ser útil nesse processo pois

O processo pelo qual o aluno precisa passar é semelhante ao processo de

desenvolvimento histórico da própria ciência [...]. As suas resistências são semelhantes às dos próprios cientistas do passado; e mesmo as suas ideias, por mais “absurdas” que pareçam, podem ser semelhantes às que foram aceitas em outros tempos por pessoas que nada tinham de tolas. Embora não haja um paralelo completo entre esses “conceitos prévios” e as concepções científicas antigas, as semelhanças acima indicadas são suficientemente fortes para tornar o conhecimento da história da ciência um importante aliado nesse trabalho (MARTINS, 2006, p.XXVI).

Ainda que seja notório a importância da HFC no ensino, tanto no nível básico quando no nível superior e em especial nas licenciaturas, existem alguns obstáculos que podem interferir na efetiva inserção da HFC no ensino de Ciências. Martins (2006) elenca três principais obstáculos para a implementação integrada da HFC no ensino. A primeira delas se refere a falta de professores com formação adequada para ensinar utilizando enfoques históricos, a carência da formação adequada pode acarretar improvisos que por sua vez podem disseminar visões equivocadas em relação a Natureza do Conhecimento Científico (MARTINS, 2006).

A segunda dificuldade está relacionada com a falta de material didático de qualidade que possa ser usado no ensino (textos históricos de boa qualidade e sem erros historiográficos) (MONTEIRO; MARTINS, 2015). Apesar de haver uma grande quantidade de livros, e até mesmo livros didáticos, e artigos que trazem diversas e informações a respeito de aspectos históricos, é necessário ser dada a devida atenção a qualidade desses materiais pois eles podem contribuir para disseminar estereótipos a respeito dos “grandes gênios” e suas descobertas, dentre outros. Assim,

Os equívocos se propagam através das revistas científicas populares, dos jornais, da televisão, da Internet, penetram nas salas de aula, são aprendidos e repetidos por outras pessoas. Os autores de livros científicos didáticos, geralmente com a melhor das intenções, introduzem em suas obras uma série de informações sobre história da ciência – em geral, também, completamente errôneas (MARTINS, 2006, p. XXVIII).

A falta de material didático adequado e suas possíveis consequências nos conduzem a terceira dificuldade citada por Martins (2006), que diz respeito as visões errôneas a respeito da própria natureza da história da ciência e em seu uso didático¹⁰, que podem se transformar em empecilhos para a formação científica pretendida. Esses obstáculos geralmente são notados quando é necessário a transposição didática da HFC da formação inicial para a realidade da sala de aula (MARTINS, 2007).

Ao apresentar uma análise de intervenções didáticas orientadas pela HFC em salas de aula de Física, Teixeira, Greca e Freire Jr. (2012), também apontam algumas

¹⁰ Discorreremos com maiores detalhes a respeito desse aspecto na seção 2.2

dificuldades na transposição didática da HFC, entre elas a resistência dos sujeitos (no caso estudantes de licenciatura em Física) a novas abordagens de ensino, que apresentam apego ao modelo mecanicista de ensino. Ainda nesse trabalho Teixeira, Greca e Freire Jr. (2012), argumentam a existência de um número reduzido de trabalhos que investigam aplicações de intervenções didáticas integrando a HFC em salas de aulas de Física e sugerem que deveria ser dispendida maior atenção a estudos empíricos de intervenções didáticas, integrando HFC no ensino de Física.

Em uma análise a respeito das estratégias de transposição didática adotadas por autores de teses e dissertações brasileiras, Silva, Teixeira e Penido (2018) evidenciam uma tendência de crescimento de propostas didáticas que buscam integrar a HFC no Ensino de Ciências, o que de acordo com os autores representa um aspecto positivo. Em relação as dificuldades encontradas na aplicação dessas abordagens os autores destacam, assim como Teixeira, Greca e Freire Jr. (2012), a resistência de licenciandos (no caso de abordagens destinadas a formação inicial) para a adoção de novas práticas de ensino. Os licenciandos citam a falta de interesse do público-alvo e a falta de tempo como os principais empecilhos para o uso didático da HFC na realidade escolar (SILVA; TEIXEIRA; PENIDO 2018).

2.1 ASPECTOS A RESPEITO DA NATUREZA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

Citamos anteriormente que o uso pedagógico da HFC no Ensino de Ciências pode contribuir para evitar ou minimizar concepções inadequadas a respeito da Natureza do Conhecimento Científico. Utilizaremos nesse trabalho o termo Natureza do Conhecimento Científico ao invés do termo Natureza da Ciência, amplamente encontrado na literatura, pois de acordo com Lederman (2019)

[...] o termo NOSK [Natureza do Conhecimento Científico] é aqui utilizado para comunicar com maior precisão o que se entende por NOSK. NOSK e NOS [Natureza da Ciência] sempre foram sinônimos e referem-se às características do conhecimento científico, que estão intimamente relacionadas, mas distintas, de como o conhecimento é desenvolvido (isto é, SI [Investigação Científica]). A mudança de frase aqui não se destina a turvar as águas. Pelo contrário, destina-se a ser mais precisa na comunicação do significado da construção historicamente referida como NOS (LEDERMAN, 2019, p. 250, tradução nossa).

Assim o termo Natureza do Conhecimento Científico é utilizado para descrever as características do processo de construção do conhecimento científico, e é consensual que uma visão adequada desse processo é um dos maiores objetivos da

educação científica (LEDERMAN, 2019; COFRÉ, *et. al.* 2019).

Gil-Pérez e colaboradores (2001) destacam que numerosos estudos têm evidenciado que o ensino, incluindo o ensino universitário, em geral disseminam visões empírico-indutivistas da ciência o que não condiz com a maneira que o conhecimento científico é construído. Argumentam também que as concepções de estudantes, compreendendo também os futuros docentes, não se diferenciam satisfatoriamente de uma concepção “popular da ciência” associado a um suposto “método científico” infalível e que concebe o conhecimento científico como uma verdade absoluta (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; COFRÉ *et. al.* 2019).

Cofré e colaboradores (2019) argumentam que diversas investigações indicam que os professores de Ciências, independentemente do nível de ensino em que atuam, possuem concepções inadequadas a respeito da Natureza do Conhecimento Científico, e destacam como concepções mais frequentes:

[...] (1) [a ideia de que] as hipóteses se tornam teorias e as teorias se tornam leis; (2) a ciência é um empreendimento objetivo, e os cientistas não utilizam sua experiência e formação para analisar os resultados ou propor explicações; (3) o conhecimento científico é uma verdade imutável; e (4) existe apenas um método científico (COFRÉ *et. al.* 2019, p. 208, tradução nossa).

No entanto, segundo Gil-Pérez e colaboradores (2001) se poderia argumentar que mesmo tendo visões equivocadas a respeito da construção do conhecimento científico, os docentes conseguem desempenhar a função de “transmissores” de conhecimentos científicos. Porém as limitações, amplamente discutidas na literatura, de um ensino transmissivo deram origem as investigações que “evidenciaram as concepções epistemológicas inadequadas e mesmo incorretas como um dos principais obstáculos aos movimentos de renovação da Educação em Ciência/Didática das Ciências” (GIL PÉREZ *et. al.*, 2001, p.126). Assim consideramos necessário estabelecer e entender o que se entende por “concepção adequada” da Natureza do Conhecimento Científico.

Reconhecemos, assim como Gil-Pérez e colaboradores (2001), a dificuldade de se falar em uma “concepção adequada” a respeito da Natureza do Conhecimento Científico, visto que existem diversas divergências e debates entre diferentes perspectivas epistemológicas de diferentes filósofos da Ciência. Buscou-se, porém, obter aspectos de uma “concepção adequada”, a partir do que se tem em comum entre as diversas perspectivas epistemológicas de autores como Popper, Khun, Bunge, Toulmin, Lakatos, Laudan, Feyerabend e Giere, buscando aspectos

essenciais em que se identifica um amplo consenso, que também pode ser denominado como “visão consensual” (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; COFRÉ *et. al.* 2019, 2020).

Entre os aspectos consensuais das diversas perspectivas epistemológicas destacamos: A recusa da ideia de “Método Científico”, esse aspecto se refere a recusa de uma visão que dissemina uma visão rígida, infalível e exata do fazer científico, atribuída a um “método científico” que consiste em um conjunto de regras e etapas que devem ser seguidas mecanicamente.

Dessa forma, ao recusar a ideia de Método Científico, destacamos como aspectos inerentes da construção do conhecimento científico, a fecundidade do **pluralismo metodológico**, o **caráter tentativo**, e o **papel da criatividade e imaginação** (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; PENA; TEIXEIRA, 2017).

No que diz respeito ao papel da imaginação na construção do conhecimento científico, Gurgel e Pietrocola (2011) definem a imaginação como a criação de objetos em um sistema simbólico. Por essa perspectiva o pensamento humano se relaciona com o mundo não apenas por meio dos sentidos, mas também por meio de representações simbólicas que constrói. Porém, a imaginação no contexto da construção do conhecimento científico não ocorrer como uma atividade puramente livre, ela necessita estar vinculada aos compromissos e valores da ciência, os novos conceitos quando produzidos devem ser conduzidos a uma construção racional, ou seja, devem se relacionar racionalmente com os outros conceitos científicos (GURGEL; PIETROCOLA, 2011).

A importância da imaginação e criatividade na produção do conhecimento científico nos conduz a um outro importante aspecto da Natureza do Conhecimento Científico, a **compreensão da ciência como um empreendimento humano**. De acordo como Gurgel e Pietrocoloa (2011),

[...] em um processo de imaginativo o sujeito tem um papel maior na criação dos conteúdos científicos, pois a percepção de uma regularidade ou a proposição de uma simetria pode ser criada por ele e não demonstrada pela natureza. [...] a palavra “descoberta” como normalmente a utilizamos, privilegia o objeto, que está pronto em suas regularidades à espera que alguém construa um caminho de acesso até ele. Já a palavra criação (ou invenção) demonstra uma maior subjetividade, pois envolve uma nova forma do indivíduo olhar uma parcela do mundo atribuindo características a mesma. Isso faz com que o indivíduo tenha uma participação ativa no processo (GURGEL; PIETROCOLA, 2011, p. 1602-2, grifo nosso).

Intimamente relacionado ao aspecto humano da construção do conhecimento científico, destacamos também a recusa de uma visão **individualista e elitista**

ciência, em que o conhecimento científico é retratado como produções de “gênios isolados”. Dessa forma, é necessário dar ênfase ao importante papel do trabalho **coletivo e colaborativo** na construção do conhecimento científico e o intercâmbio entre equipes e grupos de estudo (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; PENA; TEIXEIRA, 2017). Assim, consideramos pertinente enfatizar que “o conhecimento científico é um processo cooperativo, uma construção humana e coletiva” (PENA; TEIXEIRA, 2017, p. 159).

Consideramos conveniente destacar nesse momento o aspecto relacionado as **crises e rupturas** de teorias, os frequentes debates entre cientistas e os complexos processos de mudança de paradigma. Em relação a esses aspectos, ocorre uma contraposição a concepção **acumulativa** e **linear** do conhecimento científico. Segundo Gil Pérez e colaboradores (2001)

[...] a visão acumulativa é uma interpretação simplista da evolução dos conhecimentos científicos, para qual o ensino pode contribuir ao apresentar os conhecimentos hoje aceites sem mostrar como eles foram alcançados, não se referindo às frequentes confrontações entre teorias rivais, às controvérsias científicas, nem aos complexos processos de mudança (GIL PEREZ *et. al.*, 2001, p. 132-133, grifo nosso).

Outro aspecto da natureza do conhecimento científico digno de destaque é o seu caráter de investigação **hipotético-dedutivo**. Nesse aspecto há uma contraposição a concepção empírico-indutivista que considera o conhecimento científico como resultado de inferência indutiva a partir dos “dados puros”, nessa concepção a ciência produz “verdades absolutas” a respeito dos fenômenos estudados. Portanto consideramos extremamente relevante pôr em relevo o importante papel dos **aportes teóricos** e das **hipóteses** como orientadores do processo investigativo (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; PENA; TEIXEIRA, 2017).

Um outro aspecto inerente da Natureza do Conhecimento Científico diz respeito a busca de uma coerência global e esforços para o desenvolvimento de teorias unificadoras, visto que a Ciência tem como um de seus objetivos estabelecer teorias gerais que sejam passíveis aplicação ao maior número possível de fenômenos (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; PENA; TEIXEIRA, 2017).

É necessário também compreender o caráter **social** do desenvolvimento científico, tendo em vista que toda a investigação científica é necessariamente influenciada pelos problemas e circunstâncias do **momento histórico** e seu **contexto social** (GIL-PÉREZ *et. al.*, 2001; PENA; TEIXEIRA, 2017).

Cofré e colaboradores (2019) consideram a Natureza do Conhecimento Científico como um conjunto de características da Ciência e de seu processo de construção que são relevantes para o Ensino de Ciências. Defendem a possibilidade de descrever as características da Ciência por meio de um conjunto limitado de aspectos e características, que incluem a ciência como um empreendimento humano, os produtos da ciência e as limitações do conhecimento científico (COFRÉ *et. al.* 2019).

Consideramos importante pontuar que o conhecimento de aspectos relacionados a respeito da Natureza do Conhecimento Científico e seu processo de construção, também contribuem para que se possa identificar as pseudociências. De acordo com Fasce e Picó (2019), as pseudociências podem ser definidas como entidades ou processos que estão fora do domínio científico, porém é apresentada como tal, sendo considerada, portanto, um engano intelectual.

Apesar de aparentemente inofensivas, as pseudociências podem trazer consequências negativas para a saúde (como por exemplo os movimentos antivacinas), para educação e políticas públicas (como por exemplo a negação da ciência, negação das mudanças climáticas etc.) tornando-se um problema grave para a sociedade em geral (FASCE; PICÓ, 2019).

Dessa forma, o conhecimento e a reflexão a respeito da Natureza do Conhecimento Científico e de seus aspectos, é suficiente pelo menos para orientar atividades tanto da alfabetização científica dos futuros cidadãos e cidadãs como na formação inicial de professores e de futuros cientistas.

2.2 CUIDADOS METODOLÓGICOS HISTORIOGRÁFICOS

O uso pedagógico da HFC no ensino de Ciências possui diversas contribuições. No entanto, é necessário se atentar a alguns cuidados epistemológicos, tendo em vista que o uso de materiais de má qualidade pode prestar um desserviço para o ensino de Ciências ao invés de melhorá-lo (BATISTA, 2007, MARTINS, 2006). Qualquer reconstrução histórica, carrega em si valores, crenças e orientações metodológicas de seu autor e sua concepção a respeito da Natureza do Conhecimento Científico. Por esse motivo consideramos pertinente o conhecimento de pressupostos básico da historiografia da Ciência visando auxiliar seu uso de maneira adequada no Ensino de Ciências (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS,

2011).

O conhecimento de distorções mais comuns que podem ser encontradas em reconstruções históricas, que conseqüentemente podem disseminar concepções de Natureza do conhecimento Científico indesejadas, pode ser benéfico tanto para orientar a elaboração de reconstruções históricas quanto para se possa identificar problemas epistemológicos em um texto histórico (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011).

Um dos princípios básicos da historiografia se refere ao respeito pelo contexto em que um determinado fato ocorreu. Deve-se considerar esse contexto e evitar o anacronismo, em que os fatos do passado são interpretados por meio de ideias, valores e crenças atuais, ou seja, “estudar o passado com os olhos do presente” (MARTINS, 2005, p. 314). Na literatura a História da Ciência (HC) anacrônica pode também ser denominada de interpretação *Whig* da História ou história *Whig* (MARTINS, 2005; MARTINS 2006; HIDALGO; SCHIVANI; SILVA, 2018). Apesar do anacronismo ser um dos erros mais preocupantes em textos históricos, é um dos problemas mais encontrados tanto na divulgação científica quanto no contexto escolar (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011).

A seguir apresentaremos alguns exemplos de usos inadequados e anacrônicos de aspectos históricos, e suas implicações no Ensino de Ciências:

-*Redução da história da Ciência a nomes, datas e anedotas*: Esse tipo de equívoco é muito comum em livros didáticos, que banalizam a HC em seu uso didático. Esse tipo de uso de inadequado de aspectos históricos reforça ideias inadequadas em relação a produção do conhecimento científico, como a que a ciência é feita por “gênios” isolados, que realizam “descobertas” em datas determinadas (MARTINS, 2005; MARTINS 2006). Dessa forma a HC é apresentada como

[...] puramente descritiva, repleta de datas e informações que não têm qualquer relevância para aquilo que está sendo estudado. Esse tipo de História da Ciência apresenta, muitas vezes, alguns indivíduos como gênios que tiraram suas ideias e contribuições do nada e outros como verdadeiros imbecis que faziam tudo errado. Passa ao leitor uma visão completamente distorcida do processo de construção do pensamento científico (MARTINS, 2005, p. 314).

- *Concepções inadequadas a respeito do método científico*: Muitas vezes professores de disciplinas científicas (tanto no nível básico quanto no superior) possuem, devido a sua longa formação baseada em um ensino mecanicista, concepções inadequadas a respeito do processo de produção do conhecimento

científico. Assim na tentativa de usar a HC no ensino, baseiam sua prática em sua crença no método indutivista e disseminam para os estudantes uma concepção empírico-indutivista. Ao tentar evidenciar o desenvolvimento histórico de determinada teoria, mostram que a elaboração de uma teoria é baseada majoritariamente na observação e na experimentação, como forma de provar a teoria em questão. Argumentam, em sua tentativa de usar a HC, que determinado cientista “provou” sua teoria por meio de experimentos.

-Argumentos de autoridade: Outro exemplo de uso inadequado e ineficaz da HC se dá quando seu uso objetiva tentar obrigar a aceitação de conhecimentos científicos por meio de argumentos de autoridade, citando nomes de grandes cientistas e as ideias que defenderam (MARTINS, 2001, 2006).

Como parte do material pedagógico proposto para a Abordagem Didática, elaboramos uma composição histórico-conceitual¹¹, de acordo com o referencial Batista (2016), a respeito do conceito de Números Quânticos. A composição histórica além de compor os materiais da abordagem didática também tem o objetivo contribuir como subsídio para professores ou estudantes que busquem materiais com enfoque histórico de qualidade a respeito do tema proposto.

Consideramos relevante evidenciar que não foram encontradas composições ou reconstruções históricas com o tema Números Quânticos na literatura em língua portuguesa. Assim a composição histórico-conceitual desenvolvida contribui também para a divulgação de materiais históricos em língua portuguesa.

Considerando os diversos erros e inadequações que podem emergir de reconstruções históricas que não levam em conta as orientações da historiografia contemporânea, basearemos a construção da composição histórica¹² desenvolvida nesse trabalho e proposta com objetivos pedagógicos, no referencial teórico Martins (2005) e em Batista (2016).

O referencial teórico-metodológico Martins (2005) adotado apresenta contribuições visando auxiliar o trabalho de iniciantes em pesquisas de HC. Optamos nesse trabalho, por apresentar uma composição histórica com um enfoque conceitual (ou internalista) que segundo Martins (2005), “[...] discute os fatores científicos

¹¹ A definição do termo composição histórico-conceitual segunda Batista (2016) está presente na seção 3.3

¹² A composição histórica elaborada está presente na seção 6.1 como um dos materiais da abordagem didática proposta.

(evidências, fatos de natureza científica) relacionados a determinado assunto ou problema” (MARTINS, 2005, p. 306), mas que também trata de alguns aspectos externalistas, como influências sociais, políticas e econômicas, propagandas e fatores psicológicos.

Em relação aos aspectos da Natureza do Conhecimento Científico, que surgiram naturalmente da HC, objetivamos salientar na composição histórico-conceitual bem como na abordagem, o aspecto **coletivo e colaborativo**, o caráter **tentativo** e salientar a produção do conhecimento científico como um **empreendimento humano**.

3 FUNDAMENTAÇÕES PARA A ELABORAÇÃO DE UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL

Nesse capítulo apresentaremos os principais conceitos e definições a respeito dos referenciais teóricos metodológicos que foram levados em conta para a investigação metodológica de construção da Abordagem Didática¹³.

Dessa forma, apresentamos a seguir os conceitos e definições dos referenciais teórico metodológico da aprendizagem significativa e das unidades didáticas.

3.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Optamos na elaboração de nossa abordagem didática a utilização da teoria da aprendizagem significativa como um dos referenciais teórico-metodológicos. Dessa forma, embasaremos nossa abordagem na teoria da aprendizagem significativa, segundo David Ausubel.

Segundo Ausubel, o conceito principal de sua teoria é o conceito de **aprendizagem significativa** (MOREIRA; MASINI, 1982). Para esse autor a aprendizagem significativa é o processo pelo qual uma nova informação se relaciona com algum aspecto relevante da estrutura cognitiva do aprendiz, essa relação ocorre de maneira **não arbitrária e substantiva (não literal)** (MOREIRA; MASINI, 1982; MOREIRA, 2011).

A não-arbitrariedade se refere ao fato de que um material potencialmente significativo se relaciona de maneira não-arbitrária com o conhecimento preexistente na estrutura cognitiva do aprendiz. Assim, essa relação não ocorre com qualquer aspecto da estrutura cognitiva do aprendiz, mas sim com conhecimentos específicos, as quais Ausubel define de subsunçores (MOREIRA, 2011). Dessa forma, no processo de aprendizagem significativa

[...] a nova informação interage com uma estrutura de conhecimentos específica, a qual Ausubel define como conceitos subsunçores ou, simplesmente, subsunçores, existentes na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em conceitos relevantes preexistentes na estrutura cognitiva do indivíduo. Ausubel vê o armazenamento da informação no cérebro humano como sendo altamente organizado, formando uma hierarquia conceitual na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. Estrutura cognitiva significa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são abstrações da experiência do

¹³ A abordagem Didática proposta será apresentada detalhadamente no capítulo 6 desse trabalho.

indivíduo (MOREIRA; MASINI, 1982, p.7-8).

Já a substantividade diz respeito a substância do novo conhecimento e/ou de novas ideias, ou seja, o que é incorporado a estrutura cognitiva do aprendiz é a substância do novo conhecimento e não as palavras e signos usadas para expressá-las. Dessa maneira, “uma aprendizagem significativa não pode depender do uso **exclusivo** de determinados signos **em particular**” (MOREIRA, 2011, p.26).

Assim, a aprendizagem só pode ser dita significativa quando o conteúdo ou novas informações se relacionam de forma substantiva e não-arbitrária a conceitos subsunçores relevantes já presente na estrutura cognitiva do aprendiz. E é também por meio dessa interação que os conceitos subsunçores se modificam, e se tornam mais complexos pela aquisição de novos significados (MOREIRA, 2011, MOREIRA; MASINI, 1982). Dessa forma, “Fica, então, claro que na perspectiva ausubeliana, o conhecimento prévio (a estrutura cognitiva do aprendiz) é a variável crucial para a aprendizagem significativa” (MOREIRA, 2011, p. 26).

Considerando os preceitos básicos relacionados a aprendizagem significativa e considerando também sua complexidade, vamos agora discorrer a respeito dos princípios programáticos facilitadores da aprendizagem significativa, ou seja, princípios de estratégias que orientam como manipular atributos relevantes da estrutura cognitiva dos aprendizes para fins pedagógicos (MOREIRA, 2011, 2010).

A aprendizagem significativa pode ser facilitada por meio de princípios programáticos como os princípios da **diferenciação progressiva**, da **reconciliação integrativa**, da **organização sequencial** e da **consolidação** e por meio de estratégias facilitadoras como os organizadores prévios, os mapas conceituais e os diagramas V (MOREIRA, 2011, 2010).

O princípio da diferenciação progressiva diz respeito a organização do conteúdo de maneira que os conceitos mais inclusivos da matéria de ensino são apresentados primeiro e gradativamente diferenciados em termos de detalhes e especificidades ao longo do processo de ensino. Segundo Moreira (2010) Ausubel propôs este princípio programático baseado em duas hipóteses. A primeira é que o autor considera que é menos difícil para o ser humano captar aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo do que compreender o todo por meio de suas partes diferenciadas. A segunda hipótese é que a organização de um âmbito de conhecimentos na mente de um indivíduo se apresenta de forma hierárquica na qual

os conceitos mais inclusivos estão no topo e progressivamente se incorporam conceitos menos inclusivos e mais diferenciados.

Considerando que a estrutura cognitiva do aprendiz, é em tese, organizada hierarquicamente e que a aquisição de conceitos é menos difícil quando apresentada de acordo com a diferenciação progressiva, a apresentação do conteúdo de acordo com esse princípio pode facilitar a aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011, 2010).

No entanto a programação do conteúdo não deve apenas proporcionar a diferenciação progressiva, mas também explicitar relações entre conceitos e proposições enfatizando suas diferenças e semelhanças relevantes e reconciliar inconsistências reais ou aparentes. Explicitar as relações entre conceitos e proposições é o que Ausubel denomina de *reconciliação integradora*, ou integrativa como um princípio programático potencialmente facilitador da aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011, 2010). Segundo Moreira (2011)

A diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa são processos da dinâmica da estrutura cognitiva, mas aqui estão sendo tratados como princípios programáticos instrucionais potencialmente facilitadores da aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011, p. 41).

O princípio programático da **organização sequencial** diz respeito a organização sequencial dos conteúdos em tópicos ou unidades de estudo, da maneira mais coerente possível levando em conta os princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora e as relações de dependência existentes na matéria a ser ensinada (MOREIRA, 2011, 2010).

O princípio da **consolidação**, consiste em um princípio programático de um ensino que objetiva a aprendizagem significativa que insiste em reafirmar o domínio do conteúdo que está sendo estudado, antes de introduzir novos materiais ou conceitos. Assim, “O fato de Ausubel chamar a atenção para a consolidação é coerente com sua premissa básica de que o fator isolado mais importante influenciando a aprendizagem é o que o aprendiz já sabe” (MOREIRA, 2011, p. 42).

Considerando que a disponibilidade de subsunçores na estrutura cognitiva do aprendiz é uma condição importante para a aprendizagem significativa, caso os subsunçores não existam ou estejam obliterados Ausubel sugere manipular a estrutura cognitiva dos aprendizes por meio dos **organizadores prévios**. Os organizadores prévios são materiais introdutórios que devem ser apresentados antes do material de aprendizagem propriamente dito e que tem a função de servir de ponte

entre o que o aprendiz já sabe e o que ele deve saber, para que ao final do processo o novo material possa ser aprendido significativamente (MOREIRA, 2010, 2011, MOREIRA; MASINI, 1982). Os organizadores prévios também podem ter a função de “reativar” conceitos que existem na estrutura cognitiva do aprendiz, mas que não estão sendo usados no contexto da matéria há algum tempo (MOREIRA, 2011, 2010). De acordo com Moreira (2011),

Provavelmente, o maior potencial didático dos organizadores está na sua função de estabelecer, em um nível mais alto de generalidade, inclusividade e abstração, relações explícitas entre o novo conhecimento e o **conhecimento prévio adequado do aluno** para dar significado aos novos materiais de aprendizagem. Isto porque mesmo tendo os subsunçores adequados muitas vezes o aprendiz não percebe sua relacionabilidade com o novo conhecimento (MOREIRA, 2011, p.41).

É importante destacar que um outro aspecto fundamental para a ocorrência da aprendizagem significativa é a pré-disposição do aprendiz em aprender significativamente, ou seja, o aprendiz tem que manifestar disposição para relacionar de forma substantiva e não- arbitrária em sua estrutura cognitiva os conceitos e significados dos materiais de ensino potencialmente significativos (MOREIRA, 2011).

Para facilitar o processo de aprendizagem significativa podem ser utilizados instrumentos como os mapas conceituais e os diagramas V. Na abordagem proposta nesse trabalho, guiada pela teoria da aprendizagem significativa, optamos por utilizar como instrumento facilitador o diagrama V, ou Vê epistemológico de Gowin. A seguir apresentaremos maiores detalhes a respeito desse instrumento e seus objetivos pedagógicos.

3.1.1 O V Epistemológico

Na abordagem que elaboramos nessa investigação, propomos a utilização do V epistemológico de Gowin, como instrumento facilitador da aprendizagem significativa e como instrumento para avaliação processual durante a abordagem. O Vê epistemológico de Gowin, ou simplesmente diagrama V foi elaborado em 1977, por Gowin com o intuito de auxiliar o entendimento das pessoas em relação a estrutura do conhecimento e seu processo de construção (NOVAK; GOWIN, 1984).

Na *Figura 1* é mostrado um esquema que contém os principais elementos do Vê epistemológico de Gowin e ilustra os elementos conceituais e metodológicos envolvidos no processo de construção do conhecimento.

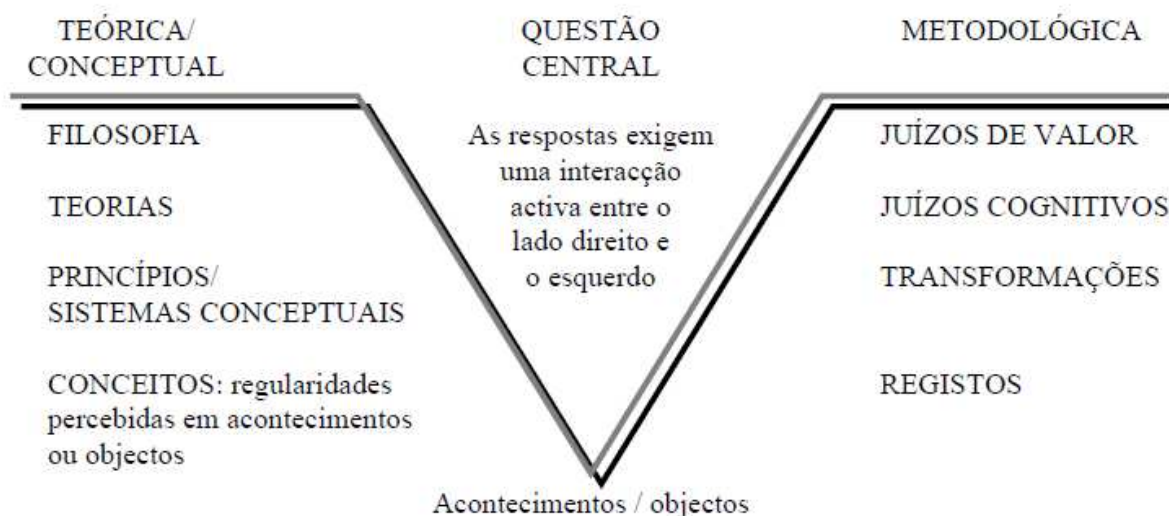


Figura 1: Principais elementos constituintes do Vê epistemológico de Gowin (NOVAK; GOWIN, 1984, p.)

No vértice do Vê se encontram os acontecimentos e objetos, e de certa forma é por onde a construção do conhecimento se inicia. Para se observar regularidades, pode ser necessário selecionar determinados acontecimentos e objetos e registrar de alguma maneira nossas observações. Nesse processo de seleção e registro de observações usamos conceitos apreendidos anteriormente pois eles influenciarão em que objetos e acontecimentos observar e que registros tomar. Os conceitos, acontecimentos/objetos e registros de acontecimentos/ objetos são três elementos que estão intimamente interligados na produção de novos conhecimentos (NOVAK; GOWIN, 1984).

Quando o instrumento do Vê epistemológico é utilizado e se observa que os estudantes estão confusos em relação aos conceitos que estão tentando aprender, de maneira geral o problema surge no vértice do Vê. Considerando esse fato, é preciso que os estudantes sejam conduzidos a reconhecer (1) que acontecimentos e objetos estão observando; (2) que conceitos que eles já conhecem se relacionam com esses acontecimentos e objetos; (3) que registros devem ser tomados (NOVAK; GOWIN, 1984).

Na *Figura 2* apresentamos uma versão mais completa dos elementos que podem estar contidos no Vê de Gowin, as palavras em **negrito** se referem a elementos chave que devem ser considerados em qualquer investigação (NOVAK; GOWIN, 1984).

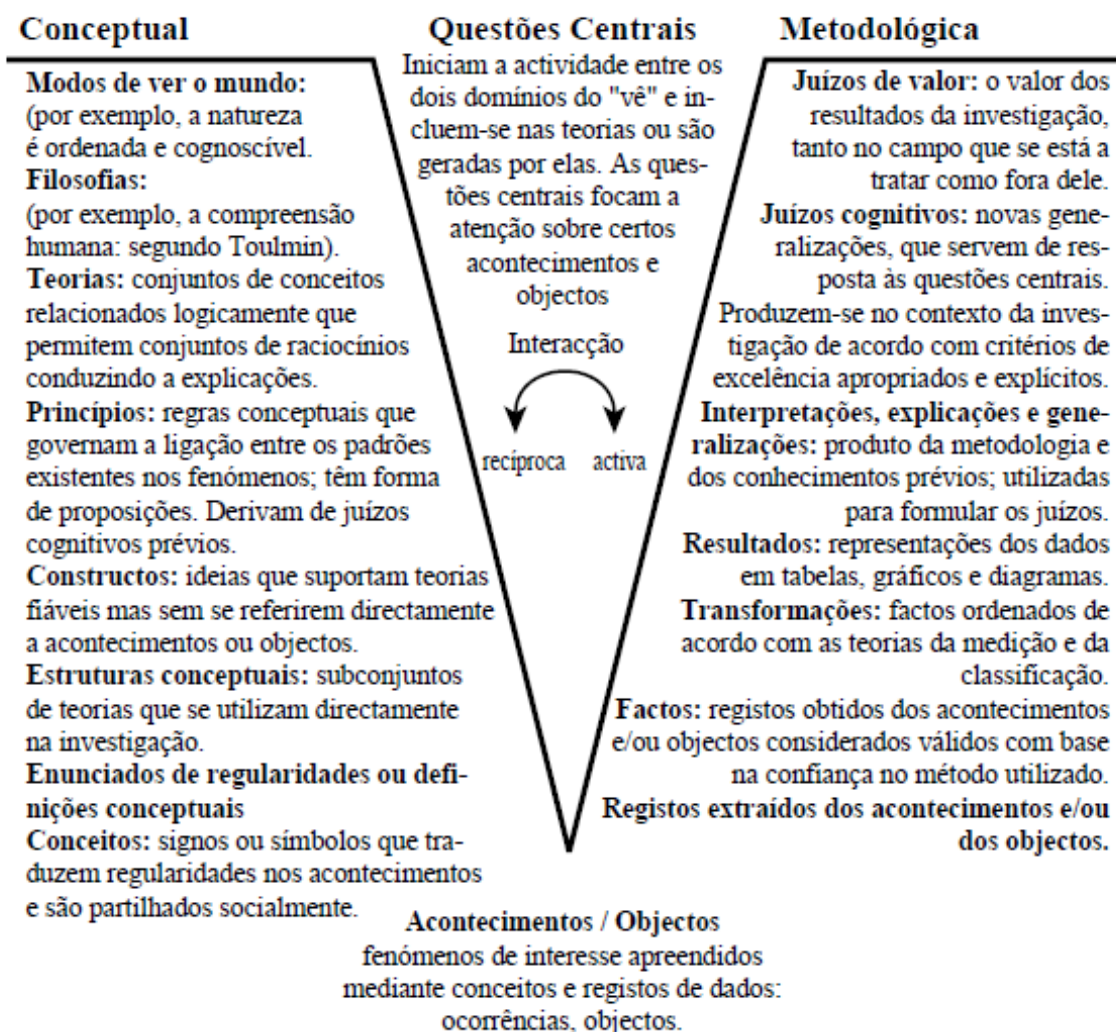


Figura 2: Versão mais completa dos elementos constituintes do diagrama em Vê de Gowin (NOVAK; GOWIN, 1984).

Os conceitos influenciam directamente na seleção dos acontecimentos e fatos observados e nos registos que serão tomados. Dessa forma, se os conceitos utilizados forem incompletos ou inadequados a pesquisa apresentará dificuldades, pois se os registos tomados forem deficientes não teremos fatos com os quais lidar e não haverá possibilidade de formulação de afirmações e hipóteses válidas. Assim,

O "Vê" ajuda nos a entender que, embora o significado de todo o conhecimento provenha, em última instância, dos acontecimentos e/ou objectos que observamos, não há nada nos registos destes acontecimentos ou objectos que nos indique o seu significado. Este deve ser construído, e somos nós que devemos manifestar como interagem todos os elementos quando construímos novos significados (NOVAK; GOWIN, 1984, p. 72).

A construção dos diagramas Vê, por meio de questões como a "questão central" nele formulada estimula nos estudantes uma boa atividade de reflexão e

auxilia os estudantes a identificar a interação entre os conceitos que eles já conhecem com os novos conhecimentos que pretendem compreender. Além de estimular a aprendizagem significativa o Vê de Gowin ajuda os estudantes a compreenderem o processo de produção do conhecimento (NOVAK; GOWIN, 1984).

Além de poderem ser aplicados a experiências e acontecimentos produzidos o Vê de Gowin também se demonstrou ser uma valiosa técnica heurística quando utilizados aplicados a materiais de leitura, e sua aplicação mais direta diz respeito a leitura crítica de artigos de investigação (NOVAK; GOWIN, 1984). Em nossa abordagem propomos atividades de construção de diagramas em Vê aplicados a materiais de leitura com o intuito de proporcionar uma leitura crítica dos materiais apresentados.

Apesar do Vê epistemológico de Gowin já ter sido amplamente estudado era provável que os licenciandos que participassem da aplicação da abordagem didática proposta não tivessem familiaridade com sua construção e os elementos que os constituem. Assim consideramos conveniente e necessário expor aqui a proposta de Novak e Gowin (1984) de como introduzir e apresentar o Vê epistemológico de Gowin e apresentar seus elementos aos estudantes.

Novak e Gowin (1984) argumentam que o processo de introdução ao Vê epistemológico de Gowin deve ser iniciado com os elementos: **conceitos, objetos, acontecimentos**. A seguir os autores sugerem que seja introduzida a ideia de **registros e questões centrais**. Segundo Novak e Gowin (1984) quando estamos envolvidos no processo de construção de conhecimentos, utilizamos conceitos dos quais já estamos familiarizados para observar acontecimentos e /ou objetos e elaborar seus registros. O tipo de registro também é influenciado por uma ou mais questões centrais, ou seja, diferentes questões nos conduzem a concentrar em diferentes aspectos dos acontecimentos e/ou objetos que observamos. Os autores aconselham a apresentação de exemplos simples que exemplifique esses aspectos. Dessa forma, “os estudantes começarão a aperceber-se de que para compreender realmente um acontecimento, ainda que aparentemente simples [...] é necessário aplicar muitos conceitos, alguns dos quais têm relativamente pouco significado para eles” (NOVAK; GOWIN, 1984, p.76).

Posteriormente, os autores sugerem que os estudantes se familiarizem com a **transformação dos registros e juízos cognitivos**. O objetivo da transformação dos registros é a organização das observações para que seja possível elaborar respostas

para a questão central. Esse elemento do Vê de Gowin pode proporcionar que os estudantes percebam que parte da criatividade necessário no processo de construção do conhecimento é usada para encontrar a melhor forma de organizar as observações e que os conceitos e princípios apreendidos anteriormente influenciam a forma como são realizados os registros. Partindo da transformação dos registros é possível construir os juízos cognitivos, que podem ser descritos como “afirmações que traduzem o que julgamos ser a resposta à nossa pergunta. Os juízos cognitivos são o resultado de uma investigação” (NOVAK; GOWIN, 1984, p.77).

É interessante deixar claro aos estudantes que para a construção do conhecimento é necessário se utilizar de conceitos e princípios apreendidos anteriormente, mas que os processo de construção de novos conhecimentos também nos permite melhorar e/ou alterar os significados desses conceitos e princípios e identificar relações entre eles (NOVAK; GOWIN, 1984).

Na parte esquerda de Vê de Gowin, acima dos conceitos, se encontram os elementos **princípios** e **teorias**. Os princípios podem ser definidos como “relações significativas entre dois ou mais conceitos, que guiam a nossa compreensão da ação significativa que ocorre nos acontecimentos que se estudam” (NOVAK; GOWIN, 1984, p. 79). Os princípios surgem a partir dos juízos cognitivos que foram produzidos dos resultados de investigações anteriores e assim, conduzem as observações de acontecimentos e objetos e as transformações de registros de novas investigações (NOVAK; GOWIN, 1984).

As teorias, de forma semelhante aos princípios, explicam as relações entre os conceitos, porém organizam os conceitos e os princípios de maneiras que eles descrevam acontecimentos e afirmações acerca desses acontecimentos. Assim, “Os princípios dizem-nos *como* se apresentam ou se comportam os acontecimentos e os objetos, enquanto as teorias nos dizem *porque* é que se apresentam ou comportam assim” (NOVAK; GOWIN, 1984, p. 81). Considerando que as teorias são amplas e inclusivas, há poucas teorias em cada disciplina estudada (NOVAK; GOWIN, 1984).

Novak e Gowin (1984) sugerem que as discussões a respeito dos elementos do Vê relacionados com o conhecimento, ou seja, os juízos cognitivos, devem ser apresentadas antes das discussões a respeito dos **juízos de valor**. O juízo de valor é um elemento do Vê de Gowin que apresentam respostas e considerações a respeito do valor dos conhecimentos, como por exemplo: “Isto é bom ou mau? Quais os benefícios que traz? Será correto? Deveríamos escolhê-lo? Podemos melhorá-lo?”

(NOVAK; GOWIN, 1984, p. 82). Consideramos conveniente enfatizar que há sempre um componente afetivo e sentimental nos juízos cognitivos e de valores (NOVAK; GOWIN, 1984).

Como dito anteriormente, utilizaremos o Vê de Gowin como instrumento de avaliação e como guia para a leitura dos materiais propostos. Assim, para essas duas finalidades consideraremos as sugestões apresentadas por Novak e Gowin (1984) em que sugerem que os estudantes ao elaborar o diagrama Vê, descrevam cada um de seus elementos de acordo com suas interpretações utilizando como guia dez questões propostas pelos autores. As questões citadas estão apresentadas abaixo:

- (1) Que objetos e/ou acontecimentos estavam a ser observados?
- (2) Que registos ou transformações de registos se fizeram?
- (3) Qual/quais foram as questões foco?
- (4) Que conceitos ou princípios relevantes se referiram ou estão implícitos?
- (5) Reconhecem-se nos registos, de uma forma válida, os principais aspectos dos acontecimentos e/ou objetos que se observam?
- (6) Os princípios relevantes foram formulados, considerados como estando implícitos ou ignorados?
- (7) Na investigação, que teoria se formulou ou se considerou implicitamente, no caso de existir alguma nestas condições?
- (8) Foi feito um esforço consciente e deliberado para ligar os conceitos e os princípios (a) aos acontecimentos e/ou objectos observados? (b) aos registos feitos? (c) às transformações de registos? (d) aos juízos cognitivos?
- (9) Formularam-se juízos de valor, e, no caso afirmativo, são congruentes com os juízos cognitivos?
- (10) Haveria uma questão foco melhor, ou será que os resultados respondem a uma outra questão central diferente da que foi colocada (ou que se infere ter sido colocada)? (NOVAK; GOWIN, 1984, p. 89).

Em relação a avaliação, utilizaremos também como guia as chaves de pontuação proposta por Novak e Gowin (1984), como apresentado no Quadro 1:

Quadro 1: Chave de pontuação para diagramas em “Vê”, desenvolvida para utilização com estudantes de ciências do ensino médio

Questão central

0 — Não está identificada nenhuma questão central.

1 — Está identificada uma questão, mas não se refere aos objetos e ao acontecimento

principal OU ao lado conceitual do “Vê”.

2 — Está identificada uma questão central; inclui conceitos, mas não sugere objetos ou o acontecimento principal OU estão identificados acontecimentos ou objetos errados em relação ao resto do exercício de laboratório.

3 — Está claramente identificada uma questão central; inclui conceitos a serem utilizados e sugere o acontecimento principal e os objetos correspondentes.

Objetos/acontecimentos

0 — Não se identificam acontecimentos nem objetos.

1 — Estão identificados o principal acontecimento OU os objetos e são consistentes

com a questão central, OU estão identificados um acontecimento e objetos, mas são inconsistentes com a questão central.

2 — Está identificado o acontecimento principal e os objetos correspondentes, e há consistência com a questão central.

3 — Sucede o mesmo que anteriormente, mas também são sugeridos os dados que se vão registar.

Teoria, princípios e conceitos

0 — Não se identifica o lado conceptual.

1 — Identificam-se alguns conceitos, mas sem quais quer princípios ou teorias, OU um dos princípios que se apresenta inicialmente é o juízo cognitivo que se pretende estabelecer com o exercício de laboratório.

2 — Identificam-se conceitos e, pelo menos, algum tipo de princípios (conceptual ou metodológico), OU identificam-se conceitos e a teoria relevante.

3 — Identificam-se conceitos e dois tipos de princípios, OU identificam-se conceitos, um tipo de princípios e uma teoria relevante.

4 — Identificam-se conceitos, dois tipos de princípios e uma teoria relevante.

Registos/transformações

0 — Não se identificam quaisquer registos ou transformações.

1 — Identificam-se registos, mas são inconsistentes com a questão central ou com o acontecimento principal.

2 — Identificam-se registos OU transformações, mas não ambos.

3 — Identificam-se registos para o acontecimento principal; as transformações são inconsistentes com o propósito da questão central.

4 — Identificam-se registos para o acontecimento principal; as transformações são consistentes com a questão central e com o nível escolar e a capacidade do estudante.

Juízos cognitivos

0 — Não se identifica nenhum juízo cognitivo.

1 — O juízo não está relacionado com o lado esquerdo do “Vê”.

2 — O juízo cognitivo inclui um conceito utilizado num contexto impróprio OU inclui uma generalização que é inconsistente com os registos e as transformações.

3 — O juízo cognitivo inclui os conceitos da questão central e deriva dos registos e transformações.

4 — Sucede o mesmo que anteriormente, mas o juízo cognitivo conduz a uma nova questão central.

3.2 UNIDADES DIDÁTICAS (UD)

A abordagem didática foi desenvolvida por meio de duas Unidades Didáticas, de acordo com o referencial teórico-metodológico Zabala (1998). De acordo com esse

referencial, uma Unidade Didática pode ser definida como:

[...] um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas, e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelos professores como pelos alunos (ZABALA, 1998, p. 18).

Ainda de acordo com Zabala (1998) as UD são instrumentos que além de incluir toda a complexidade da prática, ainda permitem incluir as 3 fases de intervenções reflexivas: o planejamento, aplicação e avaliação.

Utilizamos nesse trabalho, como norteador para a sequência das atividades propostas na UD, o exemplo de Unidade 4, proposto por Zabala (1998). De acordo com o exemplo apresentado por Zabala (1998), a Unidade 4 é composta por 10 etapas, conforme descrito abaixo:

- 1- Apresentação de uma situação problema: em que o professor apresenta uma situação problema, relacionado ao conteúdo ou tema que se deseja abordar;
- 2- Proposição de problemas ou questões: em que os estudantes mediados pelo professor explicitam os problemas apresentados pelo professor;
- 3- Respostas intuitivas ou suposições: em que os estudantes orientados pelo professor, exponham respostas ou hipóteses a respeito do problema proposto anteriormente;
- 4- Propostas de fontes de informação: etapa em que os estudantes orientados pelo professor propõem as fontes de informações mais convenientes, para a possível solução da questão proposta;
- 5- Busca de informação: em que os estudantes, individual ou coletivamente, mediados pelo professor, realizam a coleta de informações provenientes das fontes de informações fornecidas.
- 6- Elaboração de conclusões: etapa em que os estudantes, individual ou coletivamente, e novamente contando com a mediação do professor elaboram conclusões referentes ao problema proposto.
- 7- Generalização das conclusões e síntese: em que considerando as contribuições dadas pelos estudantes, o professor ou professora estabelece a conceituação, adequada em relação aos objetivos educacionais pretendidos, que se relacionam as conclusões apresentadas.

- 8- Exercícios de memorização: etapa em que os estudantes realizam exercícios de memorização, utilizando os resultados das conclusões, generalização e síntese.;
- 9- Prova ou exame;
- 10- Avaliação: etapa em que o professor ou professora baseado na avaliação realizada ao longo da unidade e no resultado da prova ou exame, comunica os resultados aos estudantes;

Optamos pela utilização desse exemplar pelo fato dele apresentar uma variedade de atividades desenvolvidas como diálogos, debates, trabalho em grupo, pesquisa entre outros. Outro ponto que consideramos importante, é que a maioria de suas fases gira em torno do protagonismo dos estudantes, fato que vai ao encontro dos preceitos da teoria de aprendizagem significativa (ZABALA, 1998; COSTA; BATISTA, 2020). No entanto, um aspecto que merece destaque é que nesse tipo de unidade o professor ou professora desempenha um papel fundamental de incentivar a participação dos estudantes, levando em conta que a motivação dos estudantes é o direciona a unidade e sem ela a sequência se interrompe (ZABALA, 1998).

Apesar de conter todas as etapas bem definidas, Zabala (1998) deixa claro que os exemplo apresentados não são rígidos e podem ser adaptados de acordo com os objetivos educacionais pretendidos, e o contexto em que se desenvolverá, tendo em vista que qualquer processo de aprendizagem é um processo extremamente complexo e influenciado por diversas variáveis e condicionantes (COSTA; BATISTA, 2020). Assim, adaptamos a unidade que não conterà as etapas 8, 9 e 10, pois as avaliações serão realizadas processualmente no decorrer da unidade.

3.3 COMPOSIÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL

Objetivando elaborar um material que posteriormente será utilizado como recurso didático para a abordagem didática elaborada, com um enfoque histórico-conceitual optamos neste trabalho por elaborar uma composição histórico- conceitual.

O termo, composição histórica é definida por Batista¹⁴ (2016) como:

[...] uma construção textual (que pode envolver atividades e elementos empíricos) que reúne, com pesos relativos conforme o assunto estudado, elementos históricos

¹⁴ O trabalho completo do referencial citado pode ser acessado pelo link < <http://www.uel.br/grupo-pesquisa/ifhiecem/arquivos/HFC.pdf>> ou pelo acesso as publicações no site do grupo de pesquisa IFHIECEM.

e historiográficos, epistemológicos, axiológicos e científicos para a inteligibilidade de um tema científico escolhido com vistas a um papel pedagógico e a disseminação de conhecimentos histórico-epistemológicos em língua portuguesa (BATISTA, 2016, p. 163).

Dessa forma a composição histórico-conceitual a respeito do conceito de Números Quânticos, além de compor os materiais da abordagem didática também tem o objetivo contribuir como subsídio para professores ou estudantes que busquem materiais com enfoque histórico de qualidade a respeito do tema proposto.

Consideramos relevante evidenciar que não foram encontradas composições ou reconstruções históricas com o tema Números Quânticos na literatura em língua portuguesa. Assim a composição histórico-conceitual desenvolvida contribui também para a divulgação de materiais históricos em língua portuguesa.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA OS ESTUDOS EMPÍRICOS

Os estudos empíricos dessa pesquisa foram desenvolvidos por meio de uma abordagem qualitativa de cunho interpretativo, baseada no referencial teórico de Bogdan e Biklen (1994). Segundo os autores, essa abordagem de pesquisa pode ser definida por cinco características:

1) O investigador se torna o principal instrumento de coleta de dados e a fonte direta desses dados é o ambiente natural, onde os fenômenos investigados ocorrem;

2) É descritiva, os dados recolhidos são expressos em forma de palavras e imagens, e podem incluir: transcrições de entrevistas, notas de campo do investigador, vídeos, documentos pessoais entre outros que possam interessar ao investigador. Nesse processo o investigador tenta analisar os dados com toda a sua riqueza.

3) Os investigadores se interessam mais pelo processo da investigação do que simplesmente pelos resultados ou produtos gerados por ela.

4) Os investigadores tendem a analisar os dados de forma indutiva, sem o objetivo de confirmar hipóteses prévias.

5) O significado é de extrema importância em uma abordagem qualitativa, os investigadores se interessam no modo como as mais diversas pessoas dão sentido as suas vidas.

Embora a investigação qualitativa interpretativa seja descrita conforme essas cinco características, não é regra que toda a investigação desse cunho possua todas elas (BOGDAN; BIKLEN, 1994).

Dessa forma foi realizado inicialmente um levantamento bibliográfico nas principais revistas brasileiras dedicadas a publicação de trabalhos em Ensino de Ciências e de Física dentre elas: Revista Brasileira de Ensino de Física; Caderno Brasileiro de Ensino de Física; Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências; Investigações em Ensino de Ciências; Experiências em Ensino de Ciências; Ciência & Educação; Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia; Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências.

Buscou-se nesse levantamento trabalhos relacionados aos assuntos que abordamos nesse trabalho a saber: trabalhos que apresentassem abordagens históricas ou histórico-filosóficas, trabalhos com a temática de Física Quântica, ou especificamente Números Quânticos e trabalhos com a temática de Natureza do

Conhecimento Científico.

Após realizado o levantamento nas revistas nacionais, identificamos uma escassez de trabalhos com a temática de Física Quântica. Por esse motivo, consideramos enriquecedor para nossa investigação fazer o levantamento também em revistas internacionais, dentre elas citamos: Enseñanza de las Ciencias; International Journal of Science Education; Science & Education e Science Education.

Com o objetivo de investigar metodologicamente a construção de uma Abordagem Didática a respeito do conceito de Números Quânticos que tenha o potencial de enriquecer a base conceitual de Licenciandos (as) de Física, consideramos de extrema importância identificar possíveis noções conceituais inadequadas (ou inexistentes) em relação ao referencial científico.

Conhecendo os conhecimentos prévios e as possíveis noções conceituais dos inadequadas dos licenciandos(as), buscamos sanar as dificuldades identificadas por meio da Abordagem Didática.

Objetivando identificar os conhecimentos prévios dos licenciandos(as) elaboramos um questionário (*Apêndice A*) contendo oito questões abertas a respeito da temática específica de Números Quânticos e noções básicas da Teoria quântica, além de aspectos da Natureza do Conhecimento Científico.

O referido questionário foi decodificado intersubjetivamente pelos membros do grupo de pesquisa IFHIECEM e em seguida enviado aos participantes por meio do aplicativo Google Forms¹⁵. Esse aplicativo permitiu que o questionário pudesse ser enviado via e-mail e/ou por meio de links. Anexado a ele foi enviado também o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido especificando todos os objetivos e finalidades da pesquisa aos participantes.

Participaram da pesquisa alunos de Licenciatura em Física da Universidade Estadual de Londrina – UEL situada na cidade de Londrina PR, que já haviam cursado disciplinas envolvendo os assuntos abordados no questionário¹⁶, de acordo com a matriz curricular do ano de 2010. Destacamos que houve uma reformulação no curso

¹⁵ Optou-se pelo uso desse aplicativo devido a necessidade do distanciamento social em decorrência da pandemia do COVID-19.

¹⁶ De acordo com as informações contidas nas ementas das disciplinas da Matriz Curricular do curso de licenciatura (Anexo A) disponível em: < <http://www.uel.br/cce/fisica/portal/pages/cursos-de-fisica/habilitacao-licenciatura.php>>.

de licenciatura de Física- UEL no ano de 2019¹⁷, porém os(as) licenciandos investigados estão inseridos na matriz curricular de 2010.

4.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO

Para a análise dos dados provenientes dos questionários, utilizamos a Análise de Conteúdo de acordo com o referencial teórico Bardin (2011). Segundo esse referencial, a análise de conteúdo pode ser atualmente designada como:

Um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos as condições de produção/ recepção (variáveis inferidas) dessas mensagens (BARDIN, 2001, p. 48).

Segundo Bardin (2011) o processo de Análise de Conteúdo se organiza em três fases cronológicas: (1) a pré-análise, (2) a exploração do material e (3) o tratamento dos resultados, a inferência e interpretação, respectivamente.

A fase de pré-análise tem por objetivo organizar os materiais a serem analisados e sistematizar as ideias iniciais. Nessa fase é realizada a escolha dos documentos que serão analisados, a formulação de hipóteses e objetivos e elaboração dos indicadores que norteiam a interpretação final. A pré-análise é composta por atividades não estruturadas como: a leitura flutuante do material, a formulação de hipóteses e objetivos, a referenciação dos índices e a elaboração de indicadores (devem ser determinadas operações como: o recorte do texto, categorização e codificação) e a preparação do material a ser analisado (BARDIN, 2011).

Se os processos da pré-análise forem devidamente concluídos a fases de exploração do material será apenas a execução sistemática das decisões tomadas. Já fase de tratamento dos resultados, inferência e interpretação os resultados são tratados de forma que se tornem significativos, podendo ser realizado por meio de operações estatísticas simples ou complexas e permitem apresentar os resultados em diagramas, figuras e modelos os quais condensam e colocam em evidência as informações oriundas da análise. Partindo dos resultados significativos se pode então cogitar inferências e interpretações que atenda aos objetivos desejados (BARDIN,

¹⁷ Matriz curricular disponível no Anexo D.

2011).

Nessa investigação utilizamos a Análise Temática, em que segundo há a necessidade de especificação de hipóteses e assim inserir a análise em um perfil teórico, nas palavras de Bardin “fazer uma análise temática consiste em descobrir os “núcleos de sentido” que compõe a comunicação e cuja presença, ou frequência de aparição, podem significar alguma coisa para o objetivo analítico escolhido” (BARDIN, 2011, p. 135).

Para esse fim, embasado nos aportes teóricos encontrados no processo de levantamento bibliográfico, elaboramos as unidades de análise, que consistem em Unidades de Contexto (UC) e Unidades de Registro (UR) e foram elaboradas previamente, ou seja, antes da coleta de dados. As Unidades de Contexto (UC) tem a função de codificar as Unidades de Registro (UR) para que se possa compreender a significação exata das Unidades de Registro (U.R.) (BARDIN, 2011).

Por sua vez as Unidades de Registro (UR) são definidas como “[...] unidade de significação codificada e corresponde ao segmento de conteúdo considerado unidade de base, visando a categorização e a contagem frequencial (BARDIN, 2011, p. 134). Como citado anteriormente as UR foram elaboradas previamente, e correspondem a hipóteses de possíveis respostas que poderiam emergir de cada questão proposta. A elaboração das UR foi embasada tanto pela literatura quanto por hipóteses pessoais da pesquisadora.

4.1.1 Unidades de Contexto (UC) e Unidades de Registro (UR) do Questionário Enviando aos Licenciandos

A seguir apresentamos as questões contidas nos questionários seguidas de suas respectivas Unidades de Análise, é importante destacar que essas unidades foram elaboradas previamente a coleta dos dados caracterizando assim um processo de investigação hipotético-dedutivo. Elaboramos também em alguns casos Unidades de Registro Emergentes (URE), que emergiram de regularidades de respostas que não faziam parte das hipóteses iniciais, mas que consideramos importantes para análise e problematização destas.

Questão 1: Durante seu curso de formação relacionado a introdução da Mecânica Quântica, que enfoques didáticos formam utilizados para o ensino de Física

Quântica?

Essa questão foi elaborada com o intuito de identificar quais enfoques e abordagens didáticas foram utilizadas durante o curso de Introdução a Física Quântica, cursada pelos licenciandos participantes da pesquisa.

UC 1- **“Enfoques didáticos no ensino de Introdução a Física Quântica”**, tem o intuito de identificar quais enfoques didáticos foram utilizados, durante o curso de formação dos licenciandos participantes, para o ensino de Física Quântica.

As UR previamente elaboradas, se basearam em resultados de pesquisas anteriores, referente aos aspectos relacionados a abordagem utilizada para o ensino de Física Moderna e Contemporânea e especificamente de Física Quântica na formação inicial de professores de Física. Para isso foram utilizados como referência Ostermann e Ricci (2004), Johansson et. al. (2018), Netto, Cavalcanti e Ostermann (2018).

Unidades de Registro (UR):

UR 1.1- **“Enfoque centrado no formalismo matemático”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o enfoque utilizado durante seu curso de formação em introdução a Física Quântica, foi centrado predominantemente no formalismo matemático.

UR 1.2- **“Enfoque em aspectos conceituais”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam, como enfoque utilizado em seu curso de formação relacionado a Introdução a Física Quântica, aspectos conceituais da Física Quântica.

UR 1.3- **“Enfoque conceitual relacionado ao formalismo matemático”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o enfoque utilizado em seu curso de formação foi centrado na relação entre os aspectos conceituais da Física Quântica e o seu formalismo matemático. E que esses dois aspectos foram abordados de forma integrada.

UR 1.4- **“Enfoque experimental”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que foi utilizado o enfoque experimental (incluindo experimentos realizados por meio de simulações computacionais) em seu curso de formação. E que os conceitos foram relacionados com resultados experimentais.

UR 1.5- **“Enfoque Histórico-Conceitual e/ou Histórico Filosófico”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que foram utilizados enfoques Histórico-Conceitual e/ ou Histórico-Filosófico em seu curso de formação.

UR 1.6- **“Enfoque baseado no livro didático”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o enfoque utilizado em seu curso foi baseado no livro didático adotado para a disciplina.

UR 1.7- **“Não lembra”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros em que os licenciandos afirmam não lembrar do enfoque utilizado em seu curso de formação.

UR 1.8- **“Não contempla a pergunta”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

URE 1.9- **“Introdução Histórica”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o enfoque utilizado em seu curso foi baseado em introduções históricas anteriores a exposição do conteúdo.

Questão 2: Em sua opinião, o que é Ciência?

Essa questão foi elaborada com o intuito de identificar as noções que os/as licenciandos/as tem a respeito da Natureza do Conhecimento Científico e/ou do termo Ciência.

UC 2- **“Noções a respeito de Ciência e/ou Natureza do conhecimento Científico”**, tem o intuito de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam suas noções a respeito do termo Ciência e/ou suas noções a respeito da Natureza do Conhecimento Científico.

Para a elaboração das UR, foram utilizados como referência os resultados de trabalhos anteriores desenvolvidos por integrantes grupo IFHIECEM, Costa, (2015) e Teixeira, El-Hani e Freire Jr. (2001).

UR 2.1 **“Ciência como conhecimento corroborado por uma comunidade científica”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que descrevem a Ciência como uma forma de conhecimento, sendo aceito por uma determinada comunidade científica em um dado momento histórico;

UR 2.2 **“Ciência como conhecimento”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos descrevem a ciência como a produção e/ou acúmulo de conhecimentos;

UR 2.3 **“Entendimento polissêmico e/ou divergente em relação à Ciência”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que envolvam divergências e ou polissemias na definição de Ciência;

UR 2.4 “**Ciência como conhecimento verdadeiro**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que descrevem a Ciência como conhecimento verdadeiro, que não pode ser questionado e nem alterado;

UR 2.5 “**Ciência como conhecimento comprovado**”, para agrupar as respostas que contenham registros que descrevem a Ciência como conhecimento comprovado por meio de dados empíricos;

UR 2.6 “**Noção salvacionista da Ciência**”, para agrupar os fragmentos textuais que contenham registros que descrevem a Ciência como um processo de investigação que busca resolver os problemas e, a partir dessa resolução, trazer benefícios para a sociedade;

UR 2.7 “**Não existe uma definição**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que descrevem que a Ciência não possui uma única definição e/ou uma definição pronta;

UR 2.8 “**Ciência como um processo de investigação**”, agrupam fragmentos textuais que apresentaram a Ciência como um processo de investigação, ou como uma tentativa de estudar, investigar, compreender e/ou explicar fenômenos naturais e/ou sociais por meio de métodos científicos.

UR 2.9 “**Noções individualistas e elitistas**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que o conhecimento científico é produzido por uma única pessoa, com habilidades excepcionais, e que, além disso, a Ciência é considerada como domínio de um grupo específico, excluindo grupos minoritários;

UR 2.10 “**Não contempla a pergunta**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta;

UR 2.11 “**Não sabe**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros em que os licenciandos afirmam não saber a respeito do assunto.

Questão 3: Em sua opinião, o desenvolvimento do conhecimento científico requer experimentos? Justifique.

UC 3- “**Importância da realização de experimentos na construção do conhecimento científico**”, tem o objetivo de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam a importância que atribuem à realização de experimentos no processo de construção do conhecimento científico.

As UR previamente elaboradas para essa questão, foram baseadas em

trabalhos anteriores do grupo IFHIECEM (COSTA, 2015) e Teixeira, El-Hani e Freire Jr. (2001).

UR 3.1- **“Muito importante, como meio de validação do conhecimento científico”**, para reunir fragmentos textuais em que os licenciandos descrevem os experimentos como instrumento de validação do conhecimento científico evidenciando uma noção verificacionista.

UR 3.2- **“Importante, como meio de testar hipóteses e/ou consequências de uma teoria”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os experimentos são importantes para testar hipóteses e/ ou as consequências de uma teoria.

UR 3.3 **“Importante, como forma de reprodução de fenômenos (em laboratório) para análise”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos expressam a experimentação com o objetivo de analisar fenômenos reproduzidos, em menor escala em laboratório, com o objetivo de analisá-los.

UR 3.4 **“Importante, como instrumento de buscar respostas ou identificar novos fenômenos”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam os experimentos como instrumento de identificar novos fenômenos ou buscar respostas.

UR 3.5 **“Importante, porém não são os únicos responsáveis pelo desenvolvimento científico”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos expressam que a experimentação (correspondência empírica) é importante, mas admitem que ela não é responsável exclusivamente pelo desenvolvimento científico.

UR 3.6 **“Pouco importante, pois o conhecimento científico não requer experimentos”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o conhecimento não requer experimentos e assumem que o conhecimento científico pode ser obtido sem a necessidade de uma comprovação experimental.

UR 3.7 **“Não sabe”**, agrupa respostas em que os licenciandos afirmam não saber opinar a respeito do assunto;

UR 3.8 **“Resposta não contempla a pergunta”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

Questão 4: No contexto da disciplina de Física, que aspectos teóricos e

propriedades físicas diferenciam a Mecânica Clássica da Mecânica Quântica?

UC 4- **“Noções a respeito dos aspectos teóricos e propriedades físicas dos objetos clássicos e quânticos”**, tem o intuito de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam suas noções a respeito dos aspectos teóricos e/ou propriedades físicas dos objetos quânticos e clássicos e suas particularidades.

Para a elaboração das UR, utilizamos como referência os resultados obtidos por Ostermann e Ricci (2004).

UR 4.1 **“A Mecânica clássica se refere a objetos macroscópicos e a Mecânica Quântica se refere a objetos atômicos e subatômicos”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos expressam o tamanho do objeto considerado (macroscópico ou atômico e subatômico) como uma diferença essencial;

UR 4.2 **“Os objetos clássicos não obedecem ao princípio de Incerteza, ao contrário dos objetos quânticos”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos mencionam aspectos relacionados ao Princípio de Incerteza (em que momento linear e posição não podem ser bem definidos simultaneamente) e o relacionam com objetos quânticos;

UR 4.3 **“Determinismo e indeterminismo”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos mencionam a possibilidade de os objetos clássicos serem descritos por equações determinísticas, enquanto objetos quânticos são descritos probabilisticamente;

UR 4.4 **“Dualidade onda-partícula”**, reúne fragmentos textuais em que os licenciandos atribuem o comportamento dual (podem se comportar como ondas ou partículas em determinadas situações) para objetos quânticos, enquanto os clássicos são sempre ou ondas ou partículas;

UR 4.5 **“Objetos quânticos são sempre relativísticos”**, reúne fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os objetos quânticos estão necessariamente em movimento relativístico;

UR 4.6 **“Propriedades Físicas contínuas e discretas”**, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos indicam como diferença que os objetos clássicos possuem propriedades físicas contínuas e os objetos quânticos propriedades físicas discretas;

UR 4.7 **“Resposta não contempla a pergunta”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta;

UR 4.8 “**Não sabe ou não lembra**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos não sabem opinar a respeito do assunto, ou que não se lembram.

URE 4.9 “**A Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica**”, agrupa fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que a Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica.

Questão 5: No contexto da disciplina de Física, o que você entende pelo conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio?

UC 5: “**Noções a respeito do conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio**” tem o objetivo de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam suas noções a respeito do conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio.

As UR elaboradas previamente foram baseadas em trabalhos encontrados na literatura (RAMOS; DA SILVA; SILVA, 2015; CIRINO; DE SOUZA, 2005) e em debates históricos apresentados por Mehra (2001) e Segrè (1987).

UR 5.1 “**Elementos que definem precisamente o estado no espaço do elétron em relação ao núcleo**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os números quânticos são elementos que definem precisamente o estado no espaço ou a posição do elétron.

UR 5.2 “**Elementos que caracterizam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os números quânticos indicam o estado no espaço do elétron, sem mencionar características determinísticas de medidas.

UR 5.3 “**Grandezas discretas**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem aos números quânticos como grandezas discretas (não necessariamente inteiros).

UR 5.4 “**Números inteiros que determinam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo**”, reúne fragmentos textuais em que os licenciandos se referem aos números quânticos como valores inteiros, que tem como objetivo determinar a posição do elétron em relação ao núcleo.

UR 5.5 “**Números que podem assumir apenas valores inteiros**”, para reunir fragmentos textuais em que os licenciandos se referem aos números quânticos como números que apenas podem assumir valores inteiros.

UR 5.6 **“Correspondem aos possíveis graus de liberdade do elétron em relação ao núcleo”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos relacionam os números quânticos a graus de liberdade dinâmicos do elétron em relação ao núcleo.

UR 5.7 **“São números que surgem diretamente da resolução da Equação de Schrödinger”**, reúne fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os números quânticos surgem diretamente a partir da resolução da equação de Schrödinger.

UR 5.8 **“Números que caracterizam estados de energia”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os números quânticos são elementos que caracterizam estados de energia do átomo e/ou do elétron.

UR 5.9 **“Apenas citam nomenclaturas”**, reúne fragmentos textuais em que os licenciando apenas citam as nomenclaturas relacionadas ao conceito, como por exemplo, número quântico principal, secundário, magnético ou spin sem fornecer nenhuma outra explicação adicional.

UR 5.10 **“Não sabe ou não lembra”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos não sabem opinar a respeito do assunto, ou que não se lembram.

UR 5.11 **“Resposta não contempla a pergunta”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

URE 5.12 **“Números que caracterizam o estado quânticos dos elétrons”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que os números quânticos são elementos que caracterizam o estado quântico dos elétrons.

Questão 6: No contexto da disciplina de Física, como você descreveria a interpretação física da função de onda proposta por Schrödinger?

UC 6 – **“Noções a respeito da interpretação da função de onda proposta por Schrödinger”**, tem o objetivo de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam suas noções a respeito da interpretação física da função de onda ($\psi(x, y, z)$) proposta por Schrödinger.

As UR previamente elaboradas foram baseadas em fatos e debates históricos apresentados por Mehra (2001), Segrè (1987) e Martins (2011).

UR 6.1- **“Função de onda complexa”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem a equação de onda ψ , proposta por Schrödinger, como

uma função de onda complexa.

UR 6.2 - **“Vibrações no espaço”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem a equação de onda ψ , proposta por Schrödinger, como um processo de vibração no átomo.

UR 6.3- **“Equação para as ondas de fase de De Broglie”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem a função de onda ψ , proposta por Schrödinger, como uma equação para as ondas de fase de De Broglie.

UR 6.4 - **“Densidade de carga elétrica”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o quadrado do módulo complexo da função de onda ($|\psi|^2$) se refere a densidade de carga elétrica.

UR 6.5 - **“Densidade de Probabilidade”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que o quadrado do módulo complexo da função de onda ($|\psi|^2$) se refere a densidade de probabilidade de encontrar um elétron em um elemento de volume.

UR 6.6 - **“Determina a posição do elétron”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem a equação de onda ψ , proposta por Schrödinger, como uma função capaz de determinar a posição do elétron no espaço.

UR 6.7- **“Função que tem como parâmetros números quânticos”**, para reunir fragmentos textuais em que os licenciandos indicam que a equação de onda ψ , proposta por Schrödinger, é uma função que tem como variáveis os números quânticos.

UR 6.8 – **“Não sabe ou não lembra”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos não sabem opinar a respeito do assunto, ou que não se lembram.

UR 6.9- **“Resposta não contempla a pergunta”**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

URE 6.10- **“Probabilidade de encontrar uma partícula”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos interpretam a função de onda ψ , proposta por Schrödinger, como a probabilidade de encontrar uma partícula em determinada região.

URE 6.11- **“Reprodução de textos encontrados em fontes bibliográficas online (Wikipedia/ Google)”**, para agrupar fragmentos textuais em que identificamos que os licenciandos consultaram e reproduziram textos de definições encontradas online (Anexo B).

Questão 7: No contexto da disciplina de Física, como você descreveria o conceito de spin do elétron?

UC 7- **“Noções a respeito do conceito de spin do elétron”**, tem o objetivo de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam suas noções a respeito do conceito de spin do elétron.

As UR elaboradas para essa questão se basearam nos resultados apresentados por Gomes e Pietrocola (2011) e em fatos históricos apresentados em Mehra (2001) e Segrè (1987).

UR 7.1- **“Movimento de rotação”**, para agrupar os fragmentos textuais em que os licenciandos se referem ao spin como um movimento de rotação do elétron;

UR 7.2- **“Momento magnético intrínseco do elétron”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem ao spin como um momento magnético intrínseco do elétron;

UR 7.3- **“Momento angular intrínseco do elétron”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos se referem ao spin como um momento magnético intrínseco do elétron;

UR 7.4- **“Número quântico”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos identificam o spin do elétron como um número quântico;

UR 7.5 – **“Grandeza que pode assumir apenas dois valores discretos ($\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$)”**, para reunir fragmentos textuais em que os licenciandos se referem ao spin como uma grandeza que pode assumir apenas dois valores ($\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$);

UR 7.6 **“Experimento de Stern-Gerlach”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos relacionam o conceito de spin ao experimento de Stern-Gerlach;

UR 7.7- **“Não sabe ou não lembra”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos declaram não saber ou não se lembrar a respeito do assunto;

UR 7.8- **Resposta não contempla a pergunta**, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

URE 7.9 **“Possíveis orientações do elétron”**, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos relacionam o conceito de spin a uma possível orientação do elétron.

Questão 8: O que você conhece a respeito dos espectros atômicos?

UC 8- “**Noções a respeito dos espectros atômicos**”, tem o objetivo de reunir fragmentos textuais em que os licenciandos expressam seus conhecimentos prévios a respeito da espectroscopia atômica.

Para a elaboração das Unidades de Registro foram utilizados como referência os resultados obtidos por Santana e Dos Santos (2017), Vasconcelos e Forato (2018) e em fatos históricos apresentados em Mehra (2001) e Segrè (1987).

UR 8.1- “**Séries espectrais**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer a respeito das séries espectrais dos elementos, e/ ou citam nomes de séries conhecidas como Lyman, Balmer, Paschen entre outras.

UR 8.2- “**Distribuição espectral da radiação do corpo negro**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer a respeito da distribuição espectral da radiação do corpo negro, e/ou citam a lei de Rayleigh-Jeans e sua dedução teórica proposta de Planck.

UR 8.3- “**Divisão de linhas espectrais na presença de um campo magnético externo**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer o fenômeno de divisão das linhas espectrais devido a presença de um campo magnético externo, e/ou citam conhecer o efeito Zeeman.

UR 8.4- “**Divisão de linhas espectrais na presença de um campo elétrico externo**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer o fenômeno de divisão das linhas espectrais devido a presença de um campo elétrico externo, e/ou citam conhecer o efeito Stark.

UR 8.5- “**Difração de raios X**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer o fenômeno de difração de raios X.

UR 8.6- “**Difração de elétrons**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos indicam conhecer a respeito dos fenômenos de difração de elétrons e/ou citam conhecer o experimento de Davisson–Germer.

UR 8.7 - “**Não sabe ou não lembra**”, para agrupar fragmentos textuais em que os licenciandos declaram não saber ou não se lembrar a respeito do assunto.

UR 8.8 – “**Resposta não contempla a pergunta**”, para agrupar fragmentos textuais que contenham registros que indicam que as/os participantes não compreenderam a pergunta, sendo a resposta incoerente em relação à pergunta.

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS EMPÍRICOS

Nesse capítulo apresentamos os resultados obtidos por meio dos questionários enviados aos licenciando e devidamente unitarizados de acordo com as UC e UR expostas na seção anterior. Consideramos conveniente dividir os resultados entre os licenciando que já cursaram disciplinas de introdução a Física Quântica de licenciandos que ainda não cursaram.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO QUESTIONÁRIO ENVIADOS A LICENCIANDOS QUE CURSARAM DISCIPLINAS DE INTRODUÇÃO A MECÂNICA QUÂNTICA

Nos quadros 2 a 9 estão expostas as unitarizações das repostas provenientes dos questionários de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica em sua graduação.

Com o objetivo de manter a confiabilidade e o sigilo em relação as suas identidades, garantidas pelo Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, codificamos os licenciandos que cursaram disciplinas de introdução a Física Quânticas como L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9 e L10¹⁸.

Quadro 2: Resultados da questão 1 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 1: “Enfoques didáticos no ensino de Introdução a Física Quântica”		
UR	Descrição	Registros
UR 1.1	“Enfoque centrado no formalismo matemático”	1 Fragmento textual
		“Aulas expositivas com várias <u>listas de exercícios</u> pra casa” (L5)
UR 1.2	“Enfoque em aspectos conceituais”	Nenhum fragmento
UR 1.3	“Enfoque conceitual relacionado ao formalismo matemático”	2 Fragmentos textuais
		“[...] foram a <u>exposição conceitual</u> em sala de aula com o auxílio da lousa,

¹⁸ A ordem das codificações foi definida de acordo com a ordem disposta pelas respostas no Google Forms.

		a leitura do livro didático e a <u>resolução de exercícios</u> ” (L4). “[...] no que se refere à Equação de Shrodinger, tive um enfoque relacionado <u>a compreensão e utilização matemática da equação</u> , bem como os instrumentos espaciais relacionado à ela, juntamente com a <u>interpretação e discussão conceitual relacionado à equação</u> ” (L8)
UR 1.4	“Enfoque experimental”	1 Fragmentos textual “[...] no Laboratório de Física Moderna vimos como eram colocada em prática o que estava vendo nas aulas teóricas” (L6)
UR 1.5	“Enfoque Conceitual e/ou Histórico-Filosófico”	Nenhum fragmento
UR 1.6	“Enfoque baseado no livro didático”	3 Fragmentos textuais “Professor executando a leitura do livro” (L2) “[...] a leitura do livro didático [...]” (L4) “Professor utilizou os conceitos do livro Paul Tipler [...]” (L6)
UR 1.7	“Não contempla a pergunta”,	1 Fragmento textual “A catástrofe do ultravioleta, e como a quantização da energia feita por Plank é solução deste problema” (L3)
UR1.8	“Não lembra”	Nenhum fragmento textual
URE 1.9	“Introdução histórica”	1 fragmento textual “Uma pequena introdução história sobre o experimento de Michelson Morley e a catástrofe do UV” (L7)

Em relação ao enfoque didático utilizado em durante a disciplina de Introdução a Mecânica Quântica, os licenciandos citaram aspetos de abordagens tradicionais

para o ensino de Mecânica Quântica, como a ênfase na aprendizagem do formalismo matemático para a resolução de exercícios tendo pouca ou nenhuma discussão conceitual, e o grande apego aos livros textos adotados (GRECA; FREIRE Jr., 2011; MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009; GRECA; MOREIRA, 2001; JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998).

Três fragmentos textuais foram alocados na unidade de registro UR 1.6, em que citam explicitamente o uso do livro didático como norteador do enfoque didático utilizado na disciplina de Introdução a Mecânica Quântica.

De acordo com Greca e Freire Jr. (2011) os livros didáticos de Mecânica Quântica em sua grande maioria apresentam longas listas de exercícios de cálculos e pouca ou nenhuma discussão conceitual. Argumentam também que os livros em geral privilegiam uma concepção instrumentalista da Mecânica Quântica. Assim, o enfoque baseado exclusivamente no livro didático pode proporcionar aos estudantes dificuldades conceituais em relação aos fundamentos da Mecânica Quântica, considerando a ausência de aspectos conceituais e interpretacionais nos livros utilizados (GRECA; FREIRE Jr., 2011; JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998).

Dois fragmentos textuais foram alocados na unidade UR 1.3, em que os (as) licenciandos (as) indicam que o enfoque utilizado em seu curso foi um enfoque conceitual relacionado ao formalismo matemático, citando que a exposição conceitual visou predominantemente a interpretação de equações, como no caso citado por L8 a equação de Schrödinger. L4 indica a discussão conceitual e a posterior resolução de exercícios.

Um fragmento textual foi alocado na unidade de registro UR 1.1, em que o (a) licenciando (a) indica que em sua disciplina de Introdução a Mecânica Quântica, o enfoque predominante foi o enfoque centrado no formalismo matemático.

Tanto os fragmentos alocados na UR 1.3 quando nos alocados na UR 1.1 estão relacionados a práticas típicas de abordagens centradas na racionalidade técnica (ou tradicionais) e no ensino transmissivo (GRECA; FREIRE Jr., 2011; MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009; SILVA; ALMEIDA, 2011; JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998). O ensino por meio dessas abordagens em cursos de licenciatura pode refletir na prática docente desses futuros docentes, tanto no que diz respeito a resistência a abordagens inovadoras de ensino quanto no que diz respeito ao conhecimento do conteúdo científico da disciplina, como discutido nas seções 1.2, 1.3

e 1,4.

Houve o registro de um fragmento textual na unidade de registro UR 1.4 relacionado ao enfoque experimental. E um fragmento alocado na unidade de registro emergente URE 1.9, em que o (a) licenciando (a) cita como enfoque utilizado a história apenas como introdução e não com uma abordagem histórico-conceitual envolvendo aspectos epistemológicos.

Dois licenciandos, que afirmaram no início do questionário já terem cursado as disciplinas de Física Moderna I A e B, presente na grade curricular da licenciatura (disponível no Anexo A) responderam nessa questão não saber o enfoque utilizado pelo fato de não terem cursado disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.

Esses fragmentos foram alocados na unidade de registro UR 1.7. Inferimos que essa aparente contradição nas respostas se deve ao fato dos licenciandos cursarem concomitantemente as habilitações de licenciatura e bacharelado, dessa forma consideraram que essa pergunta se referia ao curso de Mecânica Quântica presente na matriz curricular do bacharelado (Anexo C), e não consideraram a disciplina de Física Moderna I (A e B) da licenciatura como um curso de Introdução a Mecânica Quântica.

Destacamos que não houve nenhum registro na unidade UR 1.5, referente a abordagens histórico-conceituais e histórico-filosóficas. Devido a relevância do ensino da Física Quântica no Ensino Médio, e a falta de registros de abordagens histórico e/ou histórico filosóficas e suas respectivas potencialidades para o ensino, consideramos pertinente uma proposta de abordagem histórico-conceitual como alternativa para a formação de professores. Pois, para que a inserção da Física Quântica no Ensino Médio ocorra efetivamente é necessário privilegiar seus aspectos qualitativos, conceituais, filosóficos e culturais em detrimento do enfoque centrado no formalismo matemático (SILVA; ALMEIDA, 2011).

A seguir apresentamos os resultados e discussões provenientes da questão 2.

Quadro 3: Resultados da questão 2 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 2: “Noções a respeito de Ciência e/ou Natureza do conhecimento Científico”

Unidade	Descrição	Registros
UR 2.1	“Ciência como conhecimento corroborado por uma comunidade científica”	Nenhum fragmento textual
UR 2.2	“Ciência como conhecimento”	5 fragmentos textuais <p>“Ciência seria o processo de <u>adquirir o conhecimento [...]</u>” (L1).</p> <p>“Um conhecimento adquirido e aprofundado de algo” (L2).</p> <p>“O conjunto de conhecimentos que podemos adquirir [...]</p> <p>“[...] produzimos novos conhecimentos” (L5).</p> <p>“[...] possibilita chegar à um conhecimento entendível e justificável, para uma aproximação da realidade em uma perspectiva de interpretação” (L8).</p>
UR 2.3	“Entendimento polissêmico e/ou divergente em relação à Ciência”	Nenhum fragmento textual.
UR 2.4	“Ciência como conhecimento verdadeiro”	Nenhum fragmento textual
UR 2.5	“Ciência como conhecimento comprovado”,	Nenhum fragmento textual
UR 2.6	“Noção salvacionista da Ciência”	1 fragmento textual <p>“Aquilo que faz a humanidade dar o próximo passo” (L3)</p>
UR 2.7	“Não existe uma definição”	Nenhum fragmento textual
UR 2.8	“Ciência como um processo de investigação”	8 fragmentos textuais <p>“Ciência seria o processo de adquirir o conhecimento, <u>qualquer que seja ele, por meio de algum método científico</u>” (L1).</p> <p>“O conjunto de conhecimentos que</p>

		<p><u>podemos adquirir através dos métodos científicos. Por sua vez, métodos científicos são metodologias procedimentais utilizadas na natureza para compreender como se formam e se desenvolvem os fenômenos observados</u>” (L4).</p> <p>“Ciência é <u>método de estudo</u> [...]” (L5).</p> <p>“É <u>uma ferramenta</u> que ajuda o homem <u>explicar os fenômenos da natureza</u>” (L6).</p> <p>“É um conjunto de <u>explicações</u> formadas <u>a partir de um método</u> de observação, experimentação, criação de hipóteses e teorias que nos ajuda <u>a entender</u> o meio e a sociedade” (L7).</p> <p>“Ciência é um <u>instrumento</u> de criação, acumulação e aprimoramento de informações, <u>de maneira sistematizada e rigorosa</u> [...]” (L8).</p> <p>“[...] (o que procuramos? <u>O que queremos explicar?</u>). E a reboque desta primeira, <u>investigações</u> a respeito de que <u>meios utilizar para alcançar os objetivos</u> e o quão bem-sucedida foi/é a via escolhida” (L9).</p> <p>“Ciência pra mim é tudo o que envolve pesquisa” (L10).</p>
UR 2.9	“Noções individualistas e elitistas”	<p>1 fragmento textual</p> <p>“É uma ferramenta que ajuda o <u>homem</u> explicar os fenômenos da natureza” (L6).</p>
UR 2.10	“Não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento
UR 2.11	“Não sabe”	Nenhum fragmento

Em relação às noções a respeito da Natureza do Conhecimento Científico

apresentada pelos licenciandos, podemos notar que a maioria das repostas dos licenciandos puderam ser alocadas nas unidades de registro UR 2.2 e UR 2.8.

Oito fragmentos textuais puderam ser alocados na unidade de registro UR 2.8, que diz respeito a noção de Ciência como um processo de investigação intimamente ligado a um método ou métodos científicos. Foi possível identificar nas respostas dos licenciandos L5 e L7 “*Ciência é método de estudo [...]*” e “*[...] formadas a partir de um método de observação, experimentação, criação de hipóteses e teorias [...]*” a menção de um método de estudo. Inferimos a partir desses fragmentos que esses licenciandos possuem uma visão rígida do processo de elaboração do conhecimento científico, considerando o “método científico” como um conjunto de regras e etapas a serem seguidas, desconsiderando, portanto, a pluralidade metodológica.

Resultados semelhantes foram obtidos por Teixeira, El-Hani e Freire Jr. (2009) que investigaram as noções de licenciandos de Física a respeito da Natureza do Conhecimento Científico e por Gil-Pérez *et. al.* (2001) em uma revisão de estudos a respeito de concepções errôneas em relação a Natureza do Conhecimento Científico. De acordo com Gil- Pérez *et. al.* (2001) uma visão rígida e infalível do “método científico” implica em uma recusa a aspectos como a criatividade, o caráter tentativo da Ciência entre outros aspectos subjetivos da Natureza do Conhecimento Científico.

Apesar de relacionar diretamente a Ciência com um processo de investigação, o fragmento textual de L4: “*[...] que podemos adquirir através dos métodos científicos [...]*” indica que este licenciando considera a possibilidade da existência de mais de um método científico, apresentando uma concepção menos rígida em relação aos demais.

Também foram registrados cinco fragmentos textuais na unidade de registro UR 2.2 que diz respeito a noção de Ciência como produção e/ou acúmulo de conhecimentos. Assim como na unidade anterior resultado semelhante também foi obtido por Teixeira, El-Hani e Freire Jr. (2009) que consideraram que essa concepção pode ser compreendida como uma visão de Ciência não apenas como processos a serem seguidos, mas também como um conjunto de conhecimentos sistematizados (TEIXEIRA; EI-HANI; FREIRE JR, 2009).

Foram identificados um registro em cada uma das unidades UR 2.6 e UR 2.9. A unidade UR 2.6 diz respeito a noção salvacionista da Ciência, que considera a Ciência como um processo que visa trazer benefícios a sociedade e pode ser identificada no fragmento: “*Aquilo que faz a humanidade dar o próximo passo*” de L3.

Esse tipo de noção também pode implicar em uma visão imediatista e utilitarista da Ciência, trazendo sérias implicações para a Ciência e seu ensino.

Já a unidade UR 2.9, se refere a noções individualistas e elitistas em que o trabalho científico é um domínio reservado a minorias. Foi alocado nessa unidade o fragmento: “*É uma ferramenta que ajuda o homem explicar os fenômenos da natureza*” de L6, esse fragmento pode indicar um indício da naturalização androcêntrica da Ciência, em que o trabalho científico é considerado uma atividade masculina. Esse aspecto também é citado no trabalho de Gil-Pérez *et. al.* (2001), Carvalho e Gil- Pérez (2011) e Heerdt e Batista (2016).

Consideramos relevante destacar que não houve nenhuma resposta, ou fragmento textual relacionado com a unidade de registro UR 2.1 que diz respeito a noção de Ciência como um conhecimento aceito por uma determinada comunidade científica em um determinado momento histórico. Inferimos que essa ausência de registros pode indicar a falta de familiaridade e até a recusa de aspectos como o processo colaborativo/ coletivo, humano e tentativo da construção do conhecimento científico, bem como a influência de aspectos histórico e sociais no desenvolvimento científico.

A seguir apresentamos os resultados oriundos das respostas da questão 3.

Quadro 4: Resultados da questão 3 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 3: “ Importância da realização de experimentos na construção do conhecimento científico ”		
UR	Descrição	Registros
UR 3.1	“ Muito importante, como meio de validação do conhecimento científico ”	3 Fragmentos textuais “[...] a ciência contempla três coisas: a observação, a experimentação e as leis, ou seja, <u>usa da experimentação para a comprovação do conhecimento teórico</u> que levam às leis ou a refutação das mesmas” (L1). “[...] a <u>observação e análise de dados</u> é <u>essencial</u> para o desenvolvimento científico” (L2). “Os experimentos <u>comprovam a teoria</u> , sem eles ficamos incertos de

		nossas hipóteses” (L3).
UR 3.2	“Importante, como meio de testar hipóteses e/ou consequências de uma teoria”	2 fragmentos textuais <p>“[...] os experimentos ajudam a <u>corroborar ou falsear hipóteses</u> decorrentes deste desenvolvimento teórico” (L4).</p> <p>“Sim, para se estabelecer uma teoria precisamos de <u>evidências</u> experimentais” (L7).</p>
UR 3.3	“Importante, como forma de reprodução de fenômenos (em laboratório) para análise”,	Nenhum fragmento textual
UR 3.4	“Importante, como instrumento de buscar respostas ou identificar novos fenômenos”	1 fragmento textual <p>“Sim, pois ajuda e muito no <u>entendimento</u> do assunto” (L10).</p>
UR 3.5	“Importante, porém não são os únicos responsáveis pelo desenvolvimento científico”	3 fragmentos textual <p>“Parte do conhecimento científico pode ser <u>desenvolvido de forma puramente teórica</u> [...] (L4).</p> <p>[...] o experimento é sempre bom e auxilia, aprofunda e confirma hipóteses, porém <u>é possível a aquisição de conhecimento científico sem experimentos</u>” (L5).</p> <p>“[...] a experimentação <u>não se constitui</u> como elemento <u>indispensável</u> para o desenvolvimento do conhecimento, pois a realidade admite entendimentos outros que não o da falseabilização [...]” (L8).</p>
UR 3.6	“Pouco importante, pois o conhecimento científico não requer experimentos”	1 fragmentos textuais <p>“Não. [...] possuímos hoje, limitações tecnológicas que <u>não permitem que alguns experimentos sejam realizados</u> e precisamos nos apoiar a robustez <u>dos modelos</u> que estão sendo desenvolvidos” (L9).</p>

UR 3.7	“Não sabe”	Nenhum fragmento textual
UR 3.8	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual

No que diz respeito as noções dos(as) licenciandos(as) em relação a importância dos experimentos no processo de construção do conhecimento científico, houve uma divisão entre as noções apresentadas. Três fragmentos textuais puderam ser alocados na unidade de registro UR 3.1 e três na unidade UR 3.5.

Os fragmentos alocados na unidade UR 3.1, dizem respeito a respostas que indicam que os(as) licenciandos(as) possuem uma visão empírico-indutivista a respeito do conhecimento científico, que concebem o experimento como um instrumento para comprovar e validar hipóteses evidenciando também uma noção verificacionista. Foi alocado nessa UR o fragmento textual - “*Os experimentos comprovam a teoria, sem eles ficamos incertos de nossas hipóteses*” - de L3. Considerando esse fragmento, inferimos que este licenciando (a) não possui um conhecimento sólido a respeito da metodologia científica especificamente em relação aos termos “hipóteses”, “leis” e “teorias”, pois teorias e leis não são testáveis. Apenas as hipóteses e as consequências de leis podem ser submetidas a testes (COSTA, 2015). Resultados semelhantes também foram obtidos por Teixeira, El-Hani e Freire Jr (2009), que evidenciaram que as noções empírico-indutivistas e verificacionista se apresentam fortemente arraigadas em estudantes de Física.

Já os fragmentos alocados na UR 3.5 indicam que os licenciandos (as) consideram a experimentação e a correspondência empírica aspectos importantes, mas reconhecem que esses não são os únicos responsáveis pelo desenvolvimento do conhecimento científico, possuindo uma visão mais coerente em relação a Natureza do Conhecimento Científico.

Em relação aos fragmentos alocados na UR 3.5, podemos inferir que a noção mais coerente em relação a experimentação, se deve ao fato desses estudantes já terem participado de discussões a respeito da Natureza do Conhecimento Científico na disciplina de Evolução dos Conceitos e Teorias Física presente na grade curricular do curso de licenciatura.

Apenas dois fragmentos foram alocados na unidade UR 3.2, que consideram

os experimentos importantes como meio de testar hipóteses sem apresentar imprecisões a respeito dos termos “hipóteses”, “leis” e “teorias”.

Um fragmento textual pode ser alocado na unidade UR 3.4, em que os licenciandos (as) indicam que os experimentos são importantes para buscar respostas e compreender fenômenos.

Apenas um licenciando (a), L9 considerou a experimentação como pouco importante, citando limitações tecnológicas e a importância dos modelos científicos.

A seguir apresentaremos os resultados referentes a questão 4 expressos no Quadro 5 e suas respectivas discussões e considerações.

Quadro 5: Resultados da questão 4 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 4: “ Noções a respeito dos aspectos teóricos e propriedades físicas dos objetos clássicos e quânticos ”.		
UR	Descrição	Registros
UR 4.1	“A Mecânica clássica se refere a objetos macroscópicos e a Mecânica Quântica se refere a objetos atômicos e subatômicos”	<p>5 fragmentos textuais</p> <p>“Diferentemente da mecânica clássica que trabalha com <u>dimensões maiores</u> e velocidades menores, a mecânica quântica vai trabalhar <u>com sistemas de dimensões reduzidas [...]</u>” (L1).</p> <p>“A mecânica clássica trabalha com <u>objetos maiores [...]</u> já a mecânica quântica trabalha com partículas [...]” (L2).</p> <p>“Na <u>dimensão</u>, a mecânica clássica não consegue explicar fenômenos a nível <u>atômico ou menor</u>” (L5).</p> <p>“Mecânica clássica trata de corpos <u>macroscópico</u> enquanto que a Mecânica Quântica utiliza de ferramentas para corpos <u>microscópico</u>” (L6).</p> <p>“A diferenciação entre Mecânica Clássica e Mecânica Quântica se dá a partir do momento que a primeira não explica fenômenos em <u>escalas muito pequenas [...]</u>” (L8).</p>

UR 4.2	“Os objetos clássicos não obedecem ao princípio de Incerteza, ao contrário dos objetos quânticos”	<p>5 fragmentos textuais</p> <p>“<u>Incerteza</u>, quantização, abstração do que entendemos por realidade” (L3).</p> <p>“[...] incerteza nas medidas da mecânica quântica [...]” (L4).</p> <p>“Dualidade onde-partícula, determinismo, <u>incerteza</u>, emaranhamento” (L7).</p> <p>“Na Mecânica Clássica, podemos facilmente obter grandezas como, posição, momento e derivados. Já na Mecânica Quântica é difícil obter tais grandezas pois, dado que as coordenadas são conhecidas, a determinação de sua velocidade é impossível e vice-versa” (L9).</p> <p>“Na mecânica clássica tudo é bem definido enquanto que na mecânica quântica, é preciso lidar com incertezas” (L10).</p>
UR 4.3	“Determinismo indeterminismo”	<p>e 3 fragmentos textuais</p> <p>“A mecânica clássica [...]obtem resultados "exatos" [...] ja a mecanica quântica [...]acrescenta aos resultados a probabilidade” (L2).</p> <p>“O caráter probabilístico [...] em contraste com o caráter determinístico e corpuscular da mecânica clássica” (L4).</p> <p>“Dualidade onde-partícula, <u>determinismo</u>, incerteza, emaranhamento” (L7).</p>
UR 4.4	“Dualidade onda-partícula”	<p>2 fragmentos textuais</p> <p>[...] <u>propriedades duais</u> (onda-partícula) [...] em contraste com o caráter determinístico e <u>corpuscular</u> da mecânica clássica” (L4).</p> <p>“<u>Dualidade</u> onde-partícula, determinismo, incerteza, emaranhamento” (L7).</p>

UR 4.5	“Objetos quânticos são sempre relativísticos”	Nenhum fragmento textual
UR 4.6	“Propriedades Físicas contínuas e discretas”	2 fragmentos textuais “[...] a energia deve ser <u>quantizada e não contínua</u> ” (L1). “Incerteza, <u>quantização</u> , abstração do que entendemos por realidade” (L3).
UR 4.7	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
UR 4.8	“Não sabe ou não lembra”	Nenhum fragmento textual
URE 4.9	“A Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica”	1 fragmento textual “Sem levar em consideração efeitos puramente quânticos e de forma sucinta, a relação, <u>a Mecânica Clássica é um particular da Mecânica Quântica</u> Na Mecânica Clássica, podemos facilmente obter grandezas como, posição, momento e derivados” (L9)

Como resultados provenientes da questão 4, em relação as diferenças entre os aspectos teóricos e propriedades físicas da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, foram registrados o maior número de fragmentos textuais nas unidades de registro UR 4.1 e UR 4.2.

Cinco fragmentos textuais foram alocados na unidade de registro UR 4.1, em que os(as) licenciandos(as) citaram como diferença entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica a dimensão dos objetos estudados. Segundo os registros, os (as) licenciandos (as) indicam que a Mecânica Clássica descreve o comportamento de objetos macroscópicos e a Mecânica Quântica descreve o comportamento de objetos atômicos e subatômicos. Resultado semelhante foi obtido por Ostermann e Ricci (2004) em uma pesquisa com professores de Física de um curso de Mestrado Profissionalizante em Ensino de Ciências.

Também foram alocados cinco fragmentos textuais na UR 4.2, em que os(as)

licenciandos(as) indicam que os objetos quânticos obedecem ao Princípio de Incerteza, enquanto os objetos clássicos não. Alocamos nessa unidade de registro, os fragmentos em que os(as) licenciandos(as) citaram explicitamente a palavra “incerteza” ou tentaram explicar esse princípio.

No entanto, consideramos necessário nos atentar ao fato de que algumas respostas podem abrir margem para outras interpretações. Como discutido por Johnston, Crawford e Fletcher (1998) a palavra “incerteza” pode apresentar uma imprecisão conceitual ou uma ambiguidade. Como pode ocorrer na resposta de L3: *“Incerteza, quantização, abstração do que entendemos por realidade”*, e de L10: *“Na mecânica clássica tudo é bem definido enquanto que na mecânica quântica, é preciso lidar com incertezas”*.

De acordo com Johnston, Crawford e Fletcher (1998), a palavra “incerteza” pode ser citada associada a inexatidão nos aparelhos de medida ou limitação do processo de medida, assim como pode estar associada a indeterminação (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001).

Três fragmentos textuais foram alocados na UR 4.3 em que os(as) licenciandos(as) citam a determinismo e o indeterminismo como aspectos teóricos que diferenciam a Mecânica Clássica da Mecânica Quântica. Foram alocados nessa unidade fragmentos textuais em que os termos “determinismo”, “indeterminismo” apareciam explicitamente, e fragmentos em que os licenciandos se referiam ao caráter probabilístico da Mecânica Quântica em detrimento dos resultados “exatos” da Mecânica Clássica.

Dois fragmentos textuais foram alocados na UR 4.4, em que os (as) licenciandos(as) atribuem propriedades duais (dualidade onda-partícula) aos objetos quânticos.

Também foram alocados dois fragmentos textuais na UR 4.6, em que os (as) licenciandos (as) indicam a as propriedades físicas contínuas e discretas, como uma diferença entre a Mecânica Clássica da Mecânica Quântica.

Consideramos pertinente elaborar a unidade de registro emergente URE 4.9, em que foi alocado um fragmento textual em que o licenciando (a) indica que a Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica. Assim, inferimos que o (a) licenciando (a) desconhece as profundas distinções de aspectos teóricos entre essas duas teorias e a incomensurabilidade entre elas.

Inferimos que essa noção, identificada pela URE 4.9, pode ser uma consequência de abordagens tradicionais que devido a sua forte ênfase ao formalismo matemático, acabam negligenciando questões conceituais (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; OSTERMANN; RICCI, 2004; JOHANSSON *et. al.*, 2018).

A seguir apresentamos os resultados e discussões obtidos por meio da questão 5.

Quadro 6: Resultados da questão 5 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 5: “Noções a respeito do conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio”		
UR	Descrição	Registros
UR 5.1	“Elementos que definem precisamente o estado no espaço do elétron em relação ao núcleo”	Nenhum fragmento textual
UR 5.2	“Elementos que caracterizam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo”	2 fragmentos textuais “É a interação do elétron e <u>sua distribuição eletrônica</u> em torno do átomo [...]” (L6). “Os Números Quânticos são uma propriedade relacionada <u>a posição possível</u> dos elétrons do átomo de hidrogênio, que possuem <u>probabilidades</u> de estarem em determinadas posições[...]” (L8).
UR 5.3	“Grandezas discretas”	1 fragmento textual “[...] <u>em intervalos específicos</u> quando emitem ou absorvem quantidades específicas de energia, denominados como “pacotes”” (L8)
UR 5.4	“Números inteiros que determinam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo”	Nenhum fragmento textual
UR 5.5	“Números que podem assumir apenas valores inteiros”	Nenhum fragmento textual

UR 5.6	“Correspondem aos possíveis graus de liberdade do elétron em relação ao núcleo”	1 fragmento textual
		“São números relacionados a graus de liberdade de partículas [...]” (L5).
UR 5.7	“São números que surgem diretamente da resolução da Equação de Schrödinger”	3 fragmentos textuais
		“São os valores numéricos que proporcionam soluções aceitáveis à equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio” (L1).
		“São os valores que dão resultados aceitáveis para a equação de onda de Schrödinger para o átomo de hidrogênio” (L2).
UR 5.8	“Números que caracterizam estados de energia”	2 fragmentos textuais
		Números que caracterizam determinados estados de energia do átomo de hidrogênio” (L4). “São os números suficientes para descrever um estado de energia do elétron do átomo de H” (L7).
UR 5.9	“Apenas nomenclaturas” citam	1 fragmento textual
		“Informa o nível de energia do elétron, o subnível, a orientação dos orbitais e o spin do elétron” (L10).
UR 5.10	“Não sabe ou não lembra”	Nenhum fragmento textual
UR 5.11	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
URE 5.12	“Números que caracterizam o estado quânticos dos elétrons”	1 fragmento textual
		“Números quânticos são os que caracterizam cada elétron de um dado átomo” (L 9).

Em relação aos resultados referentes a questão 5, a respeito da noção dos(as) licenciandos (as) do conceito de números quânticos, obtivemos o maior número de

fragmentos textuais alocados nas unidades de registro UR 5.7, UR 5.2 e UR 5.8.

Três fragmentos textuais puderam ser alocados na UR 5.7, que se refere a noção que os números quânticos surgem diretamente a partir da resolução da equação de Schrödinger e/ou são os coeficientes que proporcionam soluções aceitáveis para essa equação. Inferimos que essa noção considera os números quânticos como aspectos totalmente teóricos e sem nenhuma correspondência empírica. Esse tipo de noção, como já citado anteriormente pode ser oriunda ou reforçada pelo ensino tradicional de MQ.

Dois fragmentos textuais puderam ser alocados na UR 5.2, nesses fragmentos os (as) licenciandos (as) se referem aos números quânticos como elementos que caracterizam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo. O fragmento textual do (a) licenciando (a) L6: *“É a interação do elétron e sua distribuição eletrônica em torno do átomo [...]”*, foi alocada nessa unidade pois interpretamos que ao mencionar a distribuição eletrônica, ele se referiu a distribuição em torno do núcleo atômico, e não do átomo como expresso explicitamente em sua resposta. O fragmento textual da resposta do(a) licenciando(a) L8, além de indicar a noção de números quânticos para caracterizar o posicionamento espacial do elétron ainda cita o aspecto probabilístico dessa caracterização.

Dois fragmentos textuais também foram alocados na UR 5.8, que indica que esses licenciandos (as) relacionam o conceito de números quânticos apenas aos estados de energia, tanto do átomo como citado por L4: *“Números que caracterizam determinados estados de energia do átomo de hidrogênio”*, quanto apenas do elétron ligado como expresso por L7. Pudemos identificar que em suas respostas na íntegra, tanto L4 quanto L7, citaram apenas esse aspecto, desconsiderando, portanto, os aspectos referentes ao momento angular orbital e sua quantização espacial e do momento angular intrínseco do elétron (spin).

Pudemos alocar um fragmento textual na UR 5.3, em que consideramos que o fragmento: *“[...] em intervalos específicos [...]”* de L8, se refere as propriedades discretas dos números quânticos. Nenhum fragmento textual se referiu explicitamente em relação a propriedade de discreteza dos números quânticos.

Um fragmento textual pôde ser alocado na UR 5.6, em que o (a) licenciando (a) indica que os números quânticos estão relacionados aos possíveis graus de liberdade do elétron em relação ao núcleo. Em sua resposta: *“São números relacionados a graus de liberdade de partículas, como spin e momento magnético”*, L5 cita como

exemplo, coerentemente o spin e equivocadamente o momento magnético.

Da mesma forma, um fragmento textual foi alocado na UR 5.9, em que o (a) licenciando (a) apenas cita nomenclaturas relacionadas aos números quânticos, sem apresentar nenhum outro esclarecimento.

Consideramos relevante elaborar a unidade de registro emergente URE 5.12, para alocar o fragmento textual de L9: “Números quânticos são os que caracterizam cada elétron de um dado átomo”, pois interpretamos que como não há nenhuma menção a distribuição espacial do elétron em relação ao núcleo, esse fragmento se refere a caracterização do estado quântico do elétron em um átomo.

Não identificamos nenhum fragmento textual que pudesse ser alocado nas unidades de registro UR 5.1, UR 5.4, UR 5.5, UR 5.10 e UR 5.11.

Inferimos que a ausência de registros na UR 5.1 pode ser devido ao fato de que os(as) licenciandos que expressaram a noção do conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio relacionando-o com o posicionamento espacial do elétron, tenham também uma noção mais coerente em relação ao aspecto probabilístico da MQ.

Em relação a ausência de registros nas UR 5.4 e UR 5.5, inferimos que pode ser devido a falta de discussões conceituais a respeito da evolução do conceito de números quânticos, pois nenhum licenciando(a) relaciona os números quânticos a números inteiros e apenas um licenciando(a) relaciona o conceito de números quânticos a grandezas discretas.

Considerando os resultados obtidos, exploraremos na abordagem didática proposta neste trabalho os aspectos fenomenológicos e conceituais relacionados aos números quânticos, bem como sua relação com a equação de Schrödinger. Além disso, consideramos pertinente enfatizar a propriedade de discreteza dos números quânticos.

A seguir apresentamos os resultados e as discussões dos resultados obtidos da questão 6.

Quadro 7: Resultados da questão 6 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 6: “Noções a respeito da interpretação da função de onda proposta por Schrödinger”		
UR	Descrição	Registros

UR 6.1	“Função de onda complexa”	1 fragmento textual
		“Na interpretação da Equação proposta por Schrodinger, existe um elemento matemático <u>imaginário</u> [...]” (L8).
UR 6.2	“Vibrações no espaço”	1 fragmento textual
		“Na interpretação da Equação proposta por Schrodinger, existe um elemento matemático imaginário que rompe com a ideia de Física determinística e passa a assumir <u>comportamentos oscilatórios</u> que não permitem a determinação exata da posição de partículas, mas somente a sua probabilidade. Desta forma, assume-se que <u>a matéria possui comportamentos oscilatórios</u> reinterpretados das soluções clássicas de modo que seja possível explicar as particularidades relacionadas às partículas em escalas muito pequenas” (L8).
UR 6.3	“Equação para as ondas de fase de De Broglie”	Nenhum fragmento textual
UR 6.4	“Densidade de carga elétrica”	Nenhum fragmento textual
UR 6.5	“Densidade de Probabilidade”	1 fragmento textual
		“A função de onda em si não possui interpretação física, <u>mas o módulo quadrado dela nos dá a densidade de probabilidade de encontrar uma ou mais partículas</u> em determinada região do sistema que estamos estudando” (L4).
UR 6.6	“Determina a posição do elétron”	Nenhum fragmento textual
UR 6.7	“Função que tem como parâmetro números quânticos”	Nenhum fragmento textual
UR 6.8	“Não sabe ou não lembra”	Nenhum fragmento textual

UR 6.9	“Resposta não contempla a pergunta”	2 fragmentos textuais “Função de onda é a solução da equação de Schrödinger” (L2). “Que a nossa medida interfere no sistema, o sistema está indeterminado antes da medida, ele terá uma probabilidade de colapsar para um estado específico quando medidos” (L7).
URE 6.10	“Probabilidade de encontrar uma partícula”	4 fragmentos textuais “Nos diz uma probabilidade de encontrar uma certa partícula em um determinado espaço” (L5). “[...] que não permitem a determinação exata da posição de partículas, <u>mas somente a sua probabilidade</u> (L8)”. “A função de onda é remete à <u>probabilidade</u> de encontrar uma dada partícula em um dado <u>volume</u> ” (L9). “Descreveria como a probabilidade da encontrar uma partícula em uma determinada posição” (L10)
URE 6.11	“Reprodução de textos encontrados em fontes bibliográficas (Wikipedia/ Google) online”	2 fragmentos textuais “Descreve o estado quântico de um sistema de uma ou mais partículas e todas as informações desse sistema isolado” (L1). “[...] uma função de onde descreve um estado quântico de uma ou mais partículas e contem informações desse mesmo sistema” (L6).

Em relação aos resultados obtidos pela questão 6, e unitarizados no *Quadro 7*, podemos observar que a maior parte dos fragmentos textuais puderam ser alocados nas unidades de registro URE 6.10, URE 6.11 e UR 6.9.

Quatro fragmentos textuais puderam ser alocados na URE 6.10, em que os (as)

licenciandos (as) indicam que a interpretação física da função de onda ψ em si, descreve a probabilidade de encontrar uma partícula em uma determinada região. Esses licenciandos não mencionam as propriedades da função de onda, como uma função complexa, nem o seu módulo quadrado. Dessa forma, inferimos que os(as) licenciandos(as) apresentam uma noção alternativa da função de onda ψ e sua interpretação física.

Consideramos conveniente elaborar a URE 6.11, em que foram alocados fragmentos textuais em que os (as) licenciandos (as) consultaram e reproduziram partes de textos de definições encontradas online. Foram alocados nessa URE dois fragmentos textuais, no qual pudemos identificar que as respostas consistiam na reprodução fiel de parte da definição encontrada no site Wikipedia (que pode ser consultada no Anexo B). Podemos relacionar esse resultado também como uma influência e/ou consequência do ensino tradicional, pois ao decorrer de sua formação o(a) licenciando (a) é submetido a processos de avaliação em que só é considerado bem-sucedido se apresentar a resposta “correta”. Esse fato pode ter influenciado os(as) licenciandos(as) a realizar pesquisas para responder ao questionário, mesmo que estivessem cientes que o questionário não possuía caráter avaliativo.

Dois fragmentos textuais foram alocados na UR 6.9, em que as respostas apresentadas são incoerentes a questão proposta, e dessa forma podemos inferir que os (as) licenciandos (as) não compreenderam a questão.

Um fragmento textual pôde ser alocado na UR 6.1, pois interpretamos que ao citar: “[...] existe um elemento matemático imaginário [...]” L8 ao citar o termo “imaginário” se refere a um ente matemático complexo. No entanto, inferimos que há uma imprecisão em relação aos termos “imaginário” e “complexo”.

Também foi alocado um fragmento textual na UR 6.2, em que o(a) licenciando(a) descreve a interpretação física da função de onda ψ , como um processo de vibração no átomo. Interpretamos que o fragmento textual “[...] comportamentos oscilatórios [...]” de L8 se refere a esse aspecto.

Apenas um fragmento textual pôde ser alocado na UR 6.5, em que o (a) licenciando (a) L4 cita explicitamente o módulo complexo da função de onda ($|\psi|^2$) e cita que o módulo quadrado da função de onda se refere a densidade de probabilidade de encontrar um elétron em uma determinada região.

Não identificamos nenhum fragmento textual que pudesse ser alocado nas unidades de registro UR 6.3, UR 6.4, UR 6.6, UR 6.7 e UR 6.8. Consideramos

pertinente destacar que embora na questão anterior três licenciandos (as) relacionaram os números quânticos aos resultados aceitáveis da equação de onda de Schrödinger, nenhum fragmento textual foi identificado na unidade de registro UR 6.7, ou seja, nenhum (a) licenciando (a) indicou que a função de onda ψ possui como parâmetros os números quânticos. Devido a essa inconsistência consideramos pertinente abordar essa questão na abordagem didática proposta.

A seguir apresentamos os resultados e suas respectivas discussões provenientes da questão 7.

Quadro 8: Resultados da questão 7 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 7: “Noções a respeito do conceito de spin do elétron”		
UR	Descrição	Registros
UR 7.1	“Movimento de rotação”	2 fragmentos textuais
		<p>“É a direção na qual o elétron faz um movimento de rotação” (L5).</p> <p>“São as possíveis orientações de rotação que um elétron pode ter” (L10).</p>
UR 7.2	“Momento magnético intrínseco do elétron”	Nenhum fragmento textual
UR 7.3	“Momento angular intrínseco do elétron”	3 fragmentos textuais
		“É um momento angular intrínseco [...]” (L7).
		“O spin está relacionado com o momento angular de partículas [...]” (L8).
		“O Spin está associado ao momento angular intrínseco da partícula” (L9).
UR 7.4	“Número quântico”	Nenhum fragmento textual
UR 7.5	“Grandeza que pode assumir apenas dois valores discretos	Nenhum fragmento textual

	$\left(\frac{1}{2} e \frac{-1}{2}\right)$	
UR 7.6	“Experimento de Stern-Gerlach”	Nenhum fragmento textual
UR 7.7	“Não sabe ou não lembra”	1 fragmento textual “Não descreveria” (L3).
UR 7.8	Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
URE 7.9	“Possíveis orientações do elétron”	5 fragmentos textuais “A <u>possível orientação</u> do elétron” (L1). “Spin são às <u>possíveis orientações</u> de uma partícula subatômica carregada” (L2). “É a <u>direção</u> na qual o elétron faz um movimento de rotação” (L5). “É a <u>direção</u> com que um elétron gira em torno do núcleo [...]” (L6). “São as <u>possíveis orientações</u> de rotação que um elétron pode ter” (L10).

De acordo com as unitarizações dos resultados provenientes da questão 7, expressos no *Quadro 8*, a maioria dos fragmentos textuais foram alocados nas unidades de registro URE 7.9, UR 7.3 e UR 7.1, com cinco, três e dois fragmentos respectivamente.

Identificamos cinco fragmentos textuais que puderam ser alocados na URE 7.9, em que os (as) licenciandos (as) se referem ao spin como uma orientação possível do elétron. Dos cinco fragmentos, três (L5, L6 e L10) relacionam essa orientação a um movimento de rotação ou translação do elétron. Os dois fragmentos restantes (L1 e L2) não adicionam nenhuma outra informação a resposta. As respostas de L1 e L2 estão em sua íntegra expressas no *Quadro 8* e alocadas na unidade de registro emergente URE 7.9.

Três fragmentos textuais puderam ser alocados na UR 7.3, em que os (as) licenciandos (as) se referem ao spin, explicitamente como um momento angular

intrínseco do elétron, ou partículas.

Dois fragmentos textuais foram alocados na UR 7.1, em que os (as) licenciandos (as) relacionam o conceito de spin ao movimento de rotação do elétron. Podemos inferir desse resultado que esses (as) licenciandos (as) relacionam o conceito de spin, com propriedades clássicas como o de trajetórias ou movimentos bem definidos de rotação, ao invés de considerá-lo uma propriedade essencialmente mecânica quântica.

Apenas um fragmento textual foi alocado na UR 7.7, em que o (a) licenciando (a) indica não saber ou não se lembrar a respeito do assunto. Não identificamos nenhum fragmento textual que pudesse ser alocado nas unidades de registro UR 7.2, UR 7.4, UR 7.5, UR 7.6 e UR 7.8.

Destacamos como um resultado interessante que não houve nenhum registro na UR 7.4, o que pode indicar que os (as) licenciandos não relacionam ou não consideram o spin como um número quântico. O que pode estar relacionado a ausência desse conceito nos estudos da equação e função de onda de Schrödinger, e a esse conceito ser ensinado de maneira desconexa com os demais. Por esse motivo, abordaremos em nossa proposta o conceito de spin, contextualizado historicamente envolvendo sua epistemologia e fenomenologia.

Abaixo apresentamos os resultados obtidos pela questão 8 e suas discussões.

Quadro 9: Resultados da questão 8 de licenciandos (as) que cursaram previamente disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 8: “Noções a respeito dos espectros atômicos”		
UR	Descrição	Registros
UR 8.1	“Séries espectrais”	<p>9 fragmentos textuais</p> <p>“É uma representação dos <u>comprimentos de onda emitidos por algum elemento</u>” (L1).</p> <p>“Conjunto de comprimentos de onda emitidos ou absorvidos pelo elemento” (L2).</p> <p>“Linhas espectrais emitidas pelo transito do elétron entre níveis de energia” (L3).</p> <p>“<u>Cada elemento</u> químico possui um <u>espectro</u> diferente, caracterizado</p>

		<p>pela emissão de radiação eletromagnética [...]” (L4).</p> <p>“[...] <u>os comprimentos de onda</u> que são emitidos pelo átomo, ou que ele é capaz de absorver” (L5).</p> <p>“[...] as linhas espectrais de variação de energia entre os estados dos átomos, de modo que cada elemento tem seu espectro distinto” (L7).</p> <p>“[...] está relacionado à absorção e emissão de quantidades específicas de energias em diferentes elementos atômicos” (L8).</p> <p>“Espectro atômico é uma coleção de <u>comprimentos de onda absorvidos ou emitidos por cada elemento</u>” (L9).</p> <p>“<u>Cada elemento emite um espectro</u> de luz característico em determinadas condições gerados pelos saltos de elétron[...]” (L10).</p>
UR 8.2	“Distribuição espectral da radiação do corpo negro”	Nenhum fragmento textual
UR 8.3	“Divisão de linhas espectrais na presença de um campo magnético externo”	Nenhum fragmento textual
UR 8.4	Divisão de linhas espectrais na presença de um campo elétrico externo”	Nenhum fragmento textual
UR 8.5	“Difração de raios X”	Nenhum fragmento textual
UR 8.6	“Difração de elétrons”	Nenhum fragmento textual
UR 8.7	“Não sabe ou não lembra”	Nenhum fragmento textual
UR 8.8	“Resposta não contempla a pergunta”	<p>1 fragmento textual</p> <p>“É a faixa continua no eletromagnetismo que determina as ondas de radio, TV microondas, raio</p>

	X, etc" (L6).
--	---------------

Observando o *Quadro 9*, com os resultados obtidos da questão 8, podemos notar que de dez repostas, nove foram alocadas na UR 8.1 e uma na UR 8.8.

As nove respostas alocadas na UR 8.1 se referem exclusivamente as linhas e séries espectrais dos elementos. Apenas uma resposta foi alocada na UR 8.8, em que o (a) licenciando (a) indica não ter compreendido a questão, e, portanto, sua resposta é incoerente com ela.

A questão 8 proposta nessa investigação teve o intuito de identificar as noções e conhecimentos prévios dos(as) licenciandos(as) em relação a espectroscopia atômica e dos fenômenos espectroscópicos. No entanto, após a análise dos resultados identificamos que que essa questão possui uma limitação em sua formulação. A questão da forma como foi formulada e enviada aos participantes, pode ser interpretada apenas como uma questão em que se deseja saber o que são as linhas e as séries espectrais dos elementos.

Uma forma de superar essa limitação é reformular a pergunta para: O que você conhece a respeito dos fenômenos espectroscópicos?

Dessa forma, como identificamos essa ambiguidade de interpretação os resultados provenientes dessa questão não nos permitem inferir resultados.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO QUESTIONÁRIO ENVIADOS A LICENCIANDOS QUE NÃO CURSARAM DISCIPLINAS DE INTRODUÇÃO A MECÂNICA QUÂNTICA

A seguir analisaremos os resultados oriundos das mesmas questões, porém de licenciandos que ainda não cursaram disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica em seu curso de graduação. Da mesma forma, e pelos mesmos motivos citados na seção anterior, codificamos os licenciando que ainda não cursaram em sua graduação disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica como A1, A2, A3 e A4.

Devido ao fato desses licenciandos não terem cursado essas disciplinas, a questão 1 foi desconsiderada dessa análise.

Quadro 10: Resultados da questão 2 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 2: "Noções a respeito de Ciência e/ou Natureza do conhecimento Científico"

Unidade	Descrição	Registros
UR 2.1	“Ciência como conhecimento corroborado por uma comunidade científica”	Nenhum fragmento textual
UR 2.2	“Ciência como conhecimento”	2 fragmentos textuais “Conhecimento adquirido a partir de estudos” (A3). “conjunto de conhecimentos adquiridos pela humanidade a respeito da natureza, em qualquer escala, em qualquer área” (A4).
UR 2.3	“Entendimento polissêmico e/ou divergente em relação à Ciência”	Nenhum fragmento textual.
UR 2.4	“Ciência como conhecimento verdadeiro”	Nenhum fragmento textual
UR 2.5	“Ciência como conhecimento comprovado”,	Nenhum fragmento textual
UR 2.6	“Noção salvacionista da Ciência”	Nenhum fragmento textual
UR 2.7	“Não existe uma definição”	Nenhum fragmento textual
UR 2.8	“Ciência como um processo de investigação”	1 fragmento textual “Uma ferramenta pra se analisar e compreender fenômenos desconhecidos e descrever a natureza de forma que <u>o ser humano</u> possa entender” (A2).
UR 2.9	“Noções individualistas e elitistas”	Nenhum fragmento textual
UR 2.10	“Não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento
UR 2.11	“Não sabe”	1 fragmento textual

		“Não sei explicar de forma clara” (A1).
--	--	-----------------------------------------

Em relação aos resultados obtidos por meio da questão dois, podemos notar, de acordo com o Quadro 10, que a maioria das respostas puderam ser alocadas nas unidades de registro U.R 2.2 e U.R 2.8. Resultado semelhante ao obtido por meio das respostas dos (as) licenciandos (as) que já haviam cursado disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.

De quatro fragmentos textuais identificados, dois puderam ser alocados na U.R 2.2, que diz respeito a noção de Ciência como produção ou acúmulo de conhecimentos. Consideramos relevante destacar que o (a) licenciando (a) A4 indica por meio do fragmento: *“conjunto de conhecimentos adquiridos pela **humanidade** a respeito da natureza, em qualquer escala, em qualquer área”* (A4) entender a ciência como uma construção humana e coletiva, que são importantes aspectos da Natureza do Conhecimento Científico (GIL-PÉREZ *et. al.* 2001).

Um fragmento pôde ser alocado na U.R 2.8, que se refere a concepção de Ciência como um processo de investigação e estudo de fenômenos por meio de métodos científicos para que estes possam ser compreendidos. Assim, o (a) licenciando (a) A4, o (a) licenciando A2 também cita o termo “ser humano”, o que podemos inferir que A4 também considera a Ciência como um empreendimento humano.

Um fragmento textual foi alocado na U.R 2.11, em que os (as) licenciandos (as) afirmam desconhecer ou não saber responder a respeito do assunto.

Nenhum fragmento textual foi alocado nas Unidades de Registro U.R. 2.1, U.R 2.3, U.R 2.4, U.R 2.5, U.R 2.6, U.R 2.7, U.R 2.9 e U.R 2.10. Inferimos que a ausência de fragmentos que indicam aspectos importantes da Natureza do Conhecimento Científico, como o de que a ciência é um processo coletivo e colaborativo, pode estar relacionada a falta de discussões a esse respeito ao longo das disciplinas de graduação e nas disciplinas ministradas no Ensino Médio.

Essas discussões só serão apresentadas explicitamente na disciplina de Evolução dos Conceitos e Teorias Físicas, que esses licenciandos(as) também ainda não cursaram.

A seguir apresentaremos os resultados obtidos por meio da questão 3.

Quadro 11: Resultados da questão 3 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 3: “Importância da realização de experimentos na construção do conhecimento científico”		
UR	Descrição	Registros
UR 3.1	“Muito importante, como meio de validação do conhecimento científico”	2 Fragmentos textuais
		“[...] pois é uma ferramenta de <u>provar</u> aquilo que foi proposto na teoria” (A1). “ciência é pensada nas mentes humanas, elaborada em teorias, mas <u>só é validada através de experimentos e observações</u> ” (A4).
UR 3.2	- “Importante, como meio de testar hipóteses e/ou consequências de uma teoria”	2 fragmentos textuais
		“[...] a natureza é que define a realidade de uma hipótese ou não” (A2). “[...] para <u>testar</u> as possibilidades onde aquilo é válido ou não” (A3).
UR 3.3	“Importante, como forma de reprodução de fenômenos (em laboratório) para análise”,	Nenhum fragmento textual
UR 3.4	“Importante, como instrumento de buscar respostas ou identificar novos fenômenos”	Nenhum fragmento textual
UR 3.5	“Importante, porém não são os únicos responsáveis pelo desenvolvimento científico”	Nenhum fragmento textual
UR 3.6	“Pouco importante, pois o conhecimento científico não requer experimentos”	Nenhum fragmento textual
UR 3.7	“Não sabe”	Nenhum fragmento textual
UR 3.8	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual

De maneira semelhante aos resultados obtidos pelos licenciandos (as) que já haviam cursado disciplina de Introdução a Mecânica Quântica, os resultados obtidos pelos (as) licenciandos (as) que ainda não cursaram tal disciplina, em relação a questão três também apresentou uma divisão entre as noções identificadas.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 3.1 e dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 3.2. Os fragmentos alocados na UR 3.1, dizem respeito a respostas que indicam que os(as) licenciandos(as) possuem uma visão empírico-indutivista a respeito do conhecimento científico, e concebem o experimento como uma ferramenta para comprovar e validar hipóteses evidenciando também uma noção verificacionista.

Como citado anteriormente, também foi possível identificar que os(as) licenciandos (as) investigados demonstram não possuir um conhecimento sólido a respeito da metodologia científica especificamente em relação aos termos “hipóteses”, “leis” e “teorias”. Resultados semelhantes a esses também foram identificados Teixeira, El-Hani e Freire Jr (2009).

Os fragmentos textuais alocados na U.R 3.2 dizem respeito aos fragmentos em que os (as) licenciandos (as) consideram os experimentos importantes como meio de testar hipóteses sem apresentar imprecisões a respeito dos termos “hipóteses”, “leis” e “teorias”.

Diferente dos resultados obtidos pelos (as) licenciandos que já cursaram disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica, não houve nenhum registro de fragmentos que pudessem ser alocados na unidade de registro U.R 3.5.

Também não foram identificados fragmentos textuais que pudessem ser alocados nas unidades de registro U.R 3.3, U.R 3.4, U.R 3.6, U.R 3.7 e U.R 3.8.

Quadro 12: Resultados da questão 4 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 4: “Noções a respeito dos aspectos teóricos e propriedades físicas dos objetos clássicos e quânticos”.		
UR	Descrição	Registros
UR 4.1	“A Mecânica clássica se refere a objetos macroscópicos e a Mecânica Quântica se refere a objetos atômicos e subatômicos”	1 fragmento textual “Quando passamos a trabalhar com sistemas e <u>objetos com tamanhos e</u>

		interações muito pequenas [...]“(A4).
UR 4.2	“Os objetos clássicos não obedecem ao princípio de Incerteza, ao contrário dos objetos quânticos”	Nenhum fragmento textual
UR 4.3	“Determinismo e indeterminismo”	1 fragmento textual “Natureza probabilística dos eventos [...]” (A2).
UR 4.4	“Dualidade onda-partícula”	Nenhum fragmento textual
UR 4.5	“Objetos quânticos são sempre relativísticos”	Nenhum fragmento textual
UR 4.6	“Propriedades Físicas contínuas e discretas”	Nenhum fragmento textual
UR 4.7	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
UR 4.8	“Não sabe ou não lembra”	2 fragmentos textuais “Não sei responder” (A1). “Não sei” (A3).
URE 4.9	“A Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica”	Nenhum fragmento textual

Em relação aos resultados obtidos pela questão quatro, foi possível identificar fragmentos textuais que puderam ser alocados nas unidades de registro U.R 4.1, U.R 4.3 e U.R 4.8.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 4.8, em que os(as) licenciandos(as) afirmam não saber responder ou não conhecer a respeito do assunto. Destacamos que não houve registros nessa unidade nos resultados provenientes dos(as) licenciandos (as) que já haviam cursado disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.

Um fragmento textual foi alocado na U.R 4.1, essa unidade de refere a noção

de que a Mecânica Quântica se refere a objetos atômicos e subatômicos enquanto a Mecânica Clássica se refere a objetos macroscópicos. Foi possível identificar essa noção pelo fragmento do(a) licenciando(a) A4 que cita: “*objetos com tamanhos e interações muito pequenas [...] “ao se referir aos objetos quânticos. Como citado anteriormente, resultado semelhante foi obtido por Ostermann e Ricci (2004).*

Um fragmento textual também foi alocado na U.R 4.3, em que o(a) licenciando(a) cita a “Natureza probabilística dos eventos [...]” (A2), ao se referir a Mecânica Quântica. Inferimos que esse fragmento textual diz respeito ao aspecto teórico do indeterminismo.

Destacamos que não houve nenhum registro nas unidades U.R 4.2, U.R 4.4, U.R 4.5, U.R 4.6, U.R 4.7 e U.R 4.9, e que as respostas obtidas tiveram menos detalhamentos e argumentos do que as respostas dos licenciandos que já cursaram disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica.

Apresentaremos a seguir os resultados oriundos da questão 5, expressos no Quadro 13.

Quadro 13: Resultados da questão 5 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 5: “Noções a respeito do conceito de números quânticos do átomo de hidrogênio”		
UR	Descrição	Registros
UR 5.1	“Elementos que definem precisamente o estado no espaço do elétron em relação ao núcleo”	Nenhum fragmento textual
UR 5.2	“Elementos que caracterizam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo”	1 fragmento textual [...] onde tem-se uma maior probabilidade de encontrar um elétron em <u>órbita</u> do núcleo” (A4).
UR 5.3	“Grandezas discretas”	Nenhum fragmento textual
UR 5.4	“Números inteiros que determinam o posicionamento espacial do elétron em relação ao núcleo”	Nenhum fragmento textual

UR 5.5	“Números que podem assumir apenas valores inteiros”	Nenhum fragmento textual
UR 5.6	“Correspondem aos possíveis graus de liberdade do elétron em relação ao núcleo”	Nenhum fragmento textual
UR 5.7	“São números que surgem diretamente da resolução da Equação de Schrödinger”	1 fragmento textual “São os resultados das equações de onda do átomo [...]” (A4).
UR 5.8	“Números que caracterizam estados de energia”	1 fragmento textual “grandeza escalar que indica o tipo de harmônico esférico presente no átomo para <u>um nível de energia</u> ” (A2).
UR 5.9	“Apenas nomenclaturas” citam	Nenhum fragmento textual
UR 5.10	“Não sabe ou não lembra”	2 fragmentos textuais “Não sei responder” (A1). “Não sei” (A3).
UR 5.11	“Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
URE 5.12	“Números que caracterizam o estado quânticos dos elétrons”	Nenhum fragmento textual

No que se refere aos resultados a respeito da noção dos(as) licenciandos (as) do conceito de números quânticos, foi possível identificar de acordo com o Quadro 13, que os fragmentos textuais identificados puderam ser alocados nas unidades de registro U.R 5.2, U.R 5.7, U.R 5.8 e U.R 5.10.

Dois fragmentos textuais puderam ser alocados na U.R 5.10 em que os(as) licenciandos(as) afirmam não saber responder a respeito do assunto. Um fragmento textual pôde ser alocado na U.R 5.2, em que o (a) licenciando(a) se refere aos números quânticos como os elementos que caracterizam o posicionamento espacial

do elétron em relação ao núcleo.

Um fragmento textual também pôde ser alocado na U.R 5.7, em que o(a) licenciando indica que os números quânticos surgem diretamente da resolução da equação de onda de Schrödinger, desconsiderando assim seus aspectos empíricos e fenomenológicos.

Um fragmento textual foi alocado na U.R 5.8, que se refere ao conceito de números quânticos, como números que caracterizam estados de energia do átomo.

Com exceção da unidade de registro U.R 5.10, todas as unidades de registro identificadas nas respostas dos licenciandos que cursaram disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica, foram identificadas nas respostas dos licenciandos que ainda não cursaram essas disciplinas, diferindo apenas pela quantidade de registros alocadas em cada uma delas, devido a diferença de licenciados(as) investigados em cada caso.

Quadro 14: Resultados da questão 6 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 6: “Noções a respeito da interpretação da função de onda proposta por Schrödinger”		
UR	Descrição	Registros
UR 6.1	“Função de onda complexa”	Nenhum fragmento textual
UR 6.2	“Vibrações no espaço”,	Nenhum fragmento textual
UR 6.3	“Equação para as ondas de fase de De Broglie”	Nenhum fragmento textual
UR 6.4	“Densidade de carga elétrica”	Nenhum fragmento textual
UR 6.5	“Densidade de Probabilidade”	Nenhum fragmento textual
UR 6.6	“Determina a posição do	Nenhum fragmento textual

	elétron”	
UR 6.7	“Função que tem como parâmetros quânticos”	Nenhum fragmento textual
UR 6.8	“Não sabe ou não lembra”	2 fragmentos textuais “Não sei responder” (A1). “Não sei” (A3).
UR 6.9	“Resposta não contempla a pergunta”	2 fragmentos textuais “é uma mecânica ondulatória para baixas energias, que são energias discretas” (A2). “ao tratar de objetos na escala Quântica, os resultados objetivos e definidos da Mecânica Clássica se tornam imprecisos, sendo necessário uma equação que forneça um escopo de resultados que se adequem melhor aos resultados obtidos nas observações, resultados esses que se encaixam em uma função de onda, no caso, a função de onda de Schrödinger” (A4).
URE 6.10	“Probabilidade de encontrar uma partícula”	Nenhum fragmento textual
URE 6.11	“Reprodução de textos encontrados em fontes bibliográficas online (Wikipedia/ Google)”	Nenhum fragmento textual

No que diz respeito aos resultados advindos da questão seis, unitarizados no Quadro 14, é possível observar que todos os fragmentos textuais puderam ser alocados nas unidades de registro U.R 6.8 e U.R 6.9.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 6.8, em que os(as) licenciandos(as) afirmam não saber responder. Também foram alocados dois fragmentos textuais na U.R 6.9 em que os (as) licenciandos apresentaram respostas incoerentes com a pergunta, indicando que eles não compreenderam a questão proposta.

A seguir apresentaremos os resultados provenientes da questão 7, unitarizados no Quadro 15.

Quadro 15: Resultados da questão 7 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 7: “Noções a respeito do conceito de spin do elétron”		
UR	Descrição	Registros
UR 7.1	“Movimento de rotação”	Nenhum fragmento textual
UR 7.2	“Momento magnético intrínseco do elétron”	Nenhum fragmento textual
UR 7.3	“Momento angular intrínseco do elétron”	2 fragmentos textuais “Uma grandeza vetorial, compatível com o momento angular” (A2). “Uma propriedade intrínseca do elétron, observada como um momento angular, mas, <u>ainda que o elétron não esteja de fato em rotação</u> ” (A4).
UR 7.4	“Número quântico”	Nenhum fragmento textual
UR 7.5	“Grandeza que pode assumir apenas dois valores discretos $\left(\frac{1}{2} e \frac{-1}{2}\right)$ ”	Nenhum fragmento textual
UR 7.6	“Experimento de Stern-Gerlach”	Nenhum fragmento textual
UR 7.7	“Não sabe ou não lembra”	2 fragmentos textuais “Não sei responder” (A1). “Não sei” (A3).
UR 7.8	Resposta não contempla a pergunta”	Nenhum fragmento textual
URE 7.9	“Possíveis orientações do	Nenhum fragmento textual

	elétron	
--	----------------	--

De acordo com as unitarizações das respostas para a questão sete, apresentadas no Quadro 15 é possível observar que os fragmentos textuais puderam ser alocados em apenas duas unidades de registro a U.R 7.3 e a U.R. 7.7.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 7.3 em que os(as) licenciandos se referem ao conceito de spin como o momento magnético intrínseco do elétron. Inferimos que o(a) licenciando A4 ao citar: [...] *ainda que o elétron não esteja de fato em rotação*” (A4), se refere ao spin como uma propriedade essencialmente mecânico quântico ao invés de relacionar o conceito de spin a propriedades clássicas como o de trajetórias ou movimentos bem definidos de rotação.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 7.7, em que os(as) licenciandos(as) afirmam não saber responder ou não conhecer a respeito do conceito de spin. Não foram identificados fragmentos que pudessem ser alocados nas demais unidades de registro elaboradas.

A seguir apresentaremos os resultados obtidos por meio da questão 8.

Quadro 16: Resultados da questão 8 de licenciandos (as) que ainda não cursaram disciplinas de introdução a Mecânica Quântica

Unidade de Contexto 8: “Noções a respeito dos espectros atômicos”		
UR	Descrição	Registros
UR 8.1	“Séries espectrais”	1 fragmento textual
		“Assinaturas dos átomos ao serem observados as faixas de emissão de luz de átomos excitados” (A4).
UR 8.2	“Distribuição espectral da radiação do corpo negro”	Nenhum fragmento textual
UR 8.3	“Divisão de linhas espectrais na presença de um campo magnético externo”	Nenhum fragmento textual
UR 8.4	Divisão de linhas espectrais	Nenhum fragmento textual

	na presença de um campo elétrico externo”	
UR 8.5	“Difração de raios X”	Nenhum fragmento textual
UR 8.6	“Difração de elétrons”	Nenhum fragmento textual
UR 8.7	“Não sabe ou não lembra”	2 fragmentos textuais “Não sei responder” (A1) “muito pouco” (A2).
UR 8.8	“Resposta não contempla a pergunta”	1 fragmento textual “Cada comprimento de onda corresponde a uma cor” (A3).

Em relação aos resultados da questão 9, podemos notar observando o Quadro 16, que os fragmentos identificados puderam ser alocados nas unidades de registro U.R 8.1, U.R 8.7 e U.R 8.8.

Dois fragmentos textuais foram alocados na U.R 8.7, em que os(as) licenciandos(as) afirmaram não saber ou não se lembrar a respeito do assunto. Um fragmento textual pôde ser alocado na U.R 8.8, em que as respostas apresentadas estão incoerentes com a pergunta e assim inferimos que os(as) licenciandos não compreenderam a questão proposta.

Um fragmento textual pôde ser alocado na unidade de registro U.R 8.1, em que o(a) licenciando apenas se referem as linhas e séries espectrais dos elementos.

6 UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O ENSINO DE NÚMEROS QUÂNTICOS ATÔMICOS

Apresentamos nesse capítulo uma proposta de abordagem histórico-conceitual para o ensino do conceito de Números Quânticos. Em sua elaboração utilizamos os referenciais teóricos-metodológicos da aprendizagem significativa, unidades didáticas e de composição histórico-conceitual. Os detalhamentos dos principais conceitos e definições dos referenciais supracitados foram apresentados no capítulo 3 deste trabalho.

A fim de atender um dos objetivos desse trabalho, que se refere a investigação metodológica da construção de uma abordagem didática a respeito do conceito dos números quânticos na formação inicial de professores de Física, utilizamos os resultados empíricos obtidos pelos questionários enviados aos licenciandos(as) como norteador para sua construção.

Dessa forma, considerando as análises das respostas dos questionários enviados aos licenciandos(as), buscamos nessa abordagem apresentar discussões conceitual focadas principalmente nos aspectos conceituais em que identificamos que os(as) licenciandos(as) possuem lacunas conceituais ou noções alternativas dos conceitos abordados. Assim, objetivamos com nossa abordagem sanar essas lacunas e que enriquecer a base conceitual de licenciandos(as) que já cursaram e foram aprovados em disciplinas regulares que envolvam o conceito de números quânticos e de Introdução a Mecânica Quântica (MQ).

Por se tratar de uma abordagem com enfoque histórico-conceitual elaboramos uma composição histórico-conceitual, como definido Batista (2016) que será utilizada como recurso didático para a abordagem didática.

6.1 COMPOSIÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL

A seguir apresentamos a composição-conceitual a respeito do conceito de Números Quânticos, desde o átomo de Bohr até as primeiras interpretações da Mecânica Quântica. Enfatizando também aspectos da Natureza do Conhecimento Científico como o processo coletivo e colaborativo e tentativo da produção do conhecimento científico, o papel da imaginação e da experimentação na construção de teorias físicas.

6.1.1 Modelo Atômico De Niels Bohr

Niels Henrik David Bohr (1885-1962), nasceu em 7 de outubro de 1885 em Copenhague, era filho de Cristian Bohr, Professor da Universidade de Copenhague, e Ellen Adler, filha de um banqueiro judeu. Devido as condições financeiras e intelectuais de sua família, Bohr recebeu uma excelente educação acadêmica. Ingressou na Universidade de Copenhague para estudar Matemática, Filosofia e Física, porém optou pela Física para realizar seu mestrado e doutorado, enquanto seu irmão Harald optou pela matemática (MEHRA, 2001).

Em sua tese de doutoramento trabalhou com as propriedades físicas de metais baseada na teoria eletrônica. Em 1911, apoiado por uma bolsa de estudos, foi para Cambridge onde trabalhou com J. J. Thomson (MEHRA, 2001, SEGRÈ, 1987). Durante uma visita a um amigo de seu pai em Manchester conheceu Ernest Rutherford. Bohr se impressionou com Rutherford e ficou muito feliz em receber um convite para conhecer e passar algum tempo em seu laboratório em Manchester (MEHRA, 2001; VASCONCELOS; FORATO, 2018).

O laboratório de Rutherford, era um local muito ativo na época, onde os experimentos realizados por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), para colocar em teste a equação de espalhamento de Rutherford ainda estavam em curso. Vários outros jovens colaboradores trabalharam com Rutherford dentre eles: Charles Galton Darwin (1887-1962), Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915) e George de Hevesy (MEHRA, 2001; VASCONCELOS; FORATO, 2018).

Em 1912, Bohr foi a Manchester e se inscreveu em um curso experimental de radioatividade ministrado por Rutherford (VASCONCELOS; FORATO, 2018), mas algumas semanas depois ele disse a Rutherford que gostaria de se dedicar a questões teóricas ao invés de realizar experimentos. Em particular, Bohr se dedicou a questões teóricas relacionadas com a estrutura atômica (MEHRA, 2001).

No que diz respeito às questões teóricas da estrutura atômica, Bohr tomou como ponto de partida o modelo atômico proposto por Rutherford para explicar a grande dispersão inesperada de partículas alfa observadas experimentalmente. De acordo com este modelo

Os átomos consistem numa carga positiva concentrada num ponto (numa extensão muito pequena em relação às dimensões dos átomos) rodeado por

um sistema de elétrons, cuja carga total é igual à do "núcleo" positivo; assume-se também que o núcleo é a sede da massa do átomo" (BOHR, 1963, p. XXI, apud MEHRA, 2001, p. 354, tradução nossa)¹⁹.

Bohr atentou-se a dificuldade apresentada por esse modelo em relação a estabilidade mecânica e elétrica (SEGRÈ, 1987). Com o intuito de se dedicar integralmente a questões teóricas a respeito da estrutura atômica e escrever um trabalho detalhado da constituição de átomos e moléculas, em dezembro de 1912, Bohr pediu licença de suas funções universitárias e retirou-se junto com sua esposa, para o campo (MEHRA, 2001).

Durante esse período, estudou atenciosamente a literatura a respeito do assunto e principalmente os trabalhos do astrônomo britânico John William Nicholson (1881-1955) que introduzira a constante de Planck (h) no âmbito dos modelos atômicos (MEHRA, 2001; SEGRÈ, 1987; VASCONCELOS; FORATO, 2018). Em janeiro de 1913, em uma carta enviada a Rutherford, Bohr pontuou algumas questões em que concordava e discordava de Nicholson. Segundo Bohr, tanto ele quanto Nicholson utilizaram a estrutura atômica proposta por Rutherford, para determinar as dimensões e energias dos átomos, ambos recorreram a relação entre frequência e energia, sugerida anteriormente por Max Planck²⁰ em 1900 (MEHRA, 2001).

Discordando de Nicholson, Bohr assumia que as considerações citadas acima, determinavam apenas o estado natural, ou seja, de menor energia, dos átomos enquanto Nicholson também considerava os estados menos estáveis, ou de maior energia, da mesma forma. Portanto, nesse momento, Bohr se atentou apenas ao tratamento do átomo no estado fundamental mesmo quando se referia a problemas de linhas espectrais emitidas pelos átomos. Esses apontamentos feitos por Bohr, evidenciam que ele ainda não relacionava os cálculos das frequências correspondentes às linhas do espectro visível dos átomos (MEHRA, 2001; VASCONCELOS; FORATO, 2018).

Segundo relatos de Léon Rosenfeld (1904-1974), um colaborador próximo de Bohr, em fevereiro de 1913 Bohr teve a oportunidade de discutir a respeito das questões espectroscópicas com Hans Marius Hansen (1886-1956). Hansen perguntou

¹⁹ Em seu modelo, proposto em 1911, Rutherford não define o núcleo com carga positiva e os elétrons com carga positiva apenas afirma que as cargas deveriam ter sinais opostos. Da mesma forma, Rutherford não utilizou o termo "núcleo" (VASCONCELOS; FORATO, 2018).

²⁰ Equação de Planck, se refere a equação $E=h\nu$ em que E é a energia, h a constante de Planck e ν a frequência.

a Bohr, o que seu modelo a respeito da estrutura atômica, tinha a oferecer em relação aos espectros atômicos. Naquele momento Bohr afirmou que não havia nada a dizer a respeito e acreditava que esses espectros eram muito complicados para fornecer qualquer pista a respeito da estrutura atômica. No entanto Hansen chamou a atenção de Bohr para a simplicidade em que as linhas espectrais eram representadas por Johannes Rydberg (1854-1919), e o aconselhou a consultar a equação²¹ de regularidade de frequências das linhas espectrais do hidrogênio, proposta por Johann Balmer (1825-1898) em 1885 (MEHRA, 2001, SEGRÈ, 1987; VASCONCELOS; FORATO, 2018). Anos mais tarde, em uma conversa com Rosenfeld afirmou: “Assim que vi a fórmula de Balmer, tudo de tornou claro para mim”²² (BOHR, 1963, p. XXXIX apud MEHRA, 2001, p. 358).

Ao consultar a equação de Balmer, a interpretação da regularidade das linhas espectrais em termos de diferenças de energia poderia ter sido evidente, entretanto Bohr precisou assumir que existiam apenas um conjunto discreto de estados estacionários em um átomo, e que eles poderiam ser calculados por meio da mecânica clássica, suplementada por determinadas regras quânticas (MEHRA, 2001).

Nesse período, já havia menção a respeito dos estados estacionários, que poderiam ser encontradas nas obras de Johannes Stark (1874-1957) e de Nicholson. No entanto é mais provável que Bohr tenha se baseado nos trabalhos de Nicholson, principalmente no trabalho de 1912, a respeito da constituição da coroa solar, em que Nicholson apresenta que um impulso angular de um anel de elétrons pode subir e descer apenas em múltiplos inteiros de $\frac{h}{2\pi}$, e que esse mesmo fenômeno ocorria no processo de emissão de linhas espectrais (MEHRA, 2001; VASCONCELOS; FORATO, 2018).

Em março de 1913, Bohr enviou o “primeiro capítulo”, de seu trabalho a respeito da constituição de átomos e moléculas a Rutherford, e anunciou que enviaria outros capítulos nas semanas seguintes. Nas semanas que se seguiram, Bohr realizou algumas alterações em seu primeiro capítulo, que viria a se tornar parte de uma trilogia

²¹ Equação de Balmer: $\nu = \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}$ em que n_1 e n_2 são números inteiros positivos, em que $n_1 < n_2$,

R é uma constante conhecida como constante de Rydberg. A série em que Balmer identificou a regularidade foi a série com $n_1=2$.

²² Tradução livre. Texto original: “As soon as I saw Balmer’s formula the whole thing was immediately clear to me”.

de trabalhos. A primeira parte do trabalho de Bohr, tratava principalmente de questões teóricas relacionadas aos átomos de um único elétron e de linhas espectrais e foi publicado na edição de julho de 1913 da *Philosophical Magazine*. A segunda parte de seu trabalho tratou de sistemas com apenas um núcleo, e foi publicada na edição de setembro da *Philosophical Magazine*, e a terceira parte tratou de sistemas de vários núcleos e foi publicada na edição de novembro da mesma revista (MEHRA, 2001).

O primeiro trabalho de Bohr se iniciou com considerações gerais relacionadas as ligações dos elétrons em um átomo, a existência de estados estacionários e a condição de frequência. Bohr postulou essas considerações da seguinte maneira:

(1) Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas [atômicos e moleculares] nos estados estacionários pode ser discutido com a ajuda da mecânica ordinária, enquanto a passagem dos sistemas entre estados estacionários não pode ser tratada nessa base. (2) Que este último processo é seguido da emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida é a dada pela teoria de Planck²³ (BOHR, 1913b, p. 7, apud MEHRA, 2001, p.360, tradução nossa).

Em seus trabalhos publicados em 1913, Bohr considerou que os elétrons se movem ao redor do núcleo atômico em órbitas circulares, e que a velocidade dos elétrons é pequena em relação a velocidade da luz. A relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida em um processo de passagem entre estados estacionários, como descrito anteriormente, é dada pelo modelo de Planck e pode ser descrito pela Equação 1:

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

Equação 1: Relação entre energia emitida e frequência.

em que E_1 e E_2 , correspondem as energias dos estados estacionários, h é a constante de Planck e ν a frequência da radiação emitida. Entretanto mesmo estando em movimento circular nos estados estacionários os elétrons não emitiriam radiação. Essa hipótese contrariava o eletromagnetismo clássico (MEHRA, 2001, SEGRÈ, 1987).

Ao final de seu primeiro trabalho em 1913, Bohr apresentou ainda uma importante condição, em que postula que “Para as órbitas permitidas, o momento

²³ Tradução livre. Texto original: '(1) That the dynamical equilibrium of the [atomic and molecular] systems in the stationary states can be discussed by help of the ordinary mechanics, while the passing of the systems between stationary states cannot be treated on that basis. (2) That the latter process followed by the emission of a homogeneous radiation, for which the relation between the frequency and the amount of energy emitted is the one given by Planck's theory'.

angular é um múltiplo inteiro de $\frac{h}{2\pi}$ e esse fato também pode ser usado como um critério de quantização, fornecendo os estados estacionários” (SEGRÈ, 1987, p. 131).

O modelo de Bohr para o átomo obteve êxito em descrever as séries espectrais de Balmer e Paschen para o hidrogênio e ainda previu a série espectral ultravioleta, que foi identificada um ano depois por Theodore Lyman (1874-1947), além disso foi capaz de prever o espectro do hélio ionizado. Apesar desse modelo ter dado uma explicação teórica satisfatória para espectros de átomos de um único elétron, ele não conseguiu explicar os fenômenos relacionados a átomos com vários elétrons (MEHRA, 2001).

O modelo teórico da estrutura atômica desenvolvida por Bohr, foi discutido publicamente quando Rutherford sugeriu que Bohr fosse convidado para participar da 83° *Meeting of the British Association* em *Birmingham*, realizada em 12 de setembro de 1913.

O modelo de Bohr recebeu uma aceitação mista no continente, mas teve a devida atenção da comunidade científica. George Charles de Hevesy (1885-1966), amigo de Bohr, escreveu a ele a respeito da opinião favorável de Albert Einstein (1879-1955). Por outro lado, outros físicos se mostraram bem menos receptivos como por exemplo Otto Stern (1888-1969), que afirmou que se as ideias de Bohr estivessem corretas ele abandonaria a física, e Max von Laue (1879- 1960), que afirmou que as ideias de Bohr eram absurdas e defendeu que as equações de Maxwell eram válidas em todas as circunstâncias e, portanto, um elétron em uma órbita circular deveria emitir radiação (MEHRA, 2001, SEGRÈ, 1987).

Bohr ainda enviou cópias de seus três trabalhos a respeito da constituição de átomos e moléculas a cientistas selecionados para conhecer suas opiniões referentes ao seu trabalho. Desses, principalmente Arthur Erich Haas (1884-1941), Heinrich Matthias Koenen (1874-1948), Hantaro Nagaoka (1865-1950), e Arnold Sommerfeld (1868-1951) apresentaram opiniões favoráveis ao trabalho e felicitaram-no (MEHRA, 2001).

Apesar da aceitação heterogênea relacionada ao modelo de estrutura atômica de Bohr, o mais importante foi que comunidade científica tomou conhecimento de seu modelo, que mais tarde teve suporte em evidências empíricas. Uma dessas evidências foi identificada principalmente por Henry Gwyn Jeffreys Moseley, que fazia parte do grupo de colaboradores de Rutherford em Manchester, e em 1913 começou

a realizar uma investigação sistemática dos espectros característicos de raios-X para diferentes substâncias (MEHRA, 2001; SEGRÉ, 1987).

Moseley foi capaz de determinar e fotografar as principais linhas dos espectros de raios-X da maioria dos elementos, além de medir os valores derivados para o número atômico (Z)²⁴ dos referidos elementos. Em uma carta endereçada a Bohr em 16 de novembro de 1913, ele relatou seus resultados e por meio de uma tabela de valores derivados para o número atômico, chamou atenção para o fato de ter identificado que a sequência correta na tabela periódica deveria ser Fe-Co-Ni em vez de Fe-Ni-Co (que estavam organizados de acordo com os pesos atômicos). Em seu artigo Moseley observou que as propriedades químicas são regidas pelos números atômicos, que segundo o modelo atômico de Rutherford-Bohr correspondem ao número de elétrons no átomo, enquanto o peso atômico (A) deveria ser uma função complexa de Z (MEHRA, 2001).

Os resultados obtidos por Moseley evidentemente corroboravam com o modelo de estrutura atômica de Bohr e Rutherford. Tanto que em uma carta enviada a revista *Nature*, Rutherford salientou que a sugestão originalmente dada por Van den Broek (1870- 1926), de que a carga do núcleo seria igual ao número atômico e não a metade do peso atômico parecia promissora e foi utilizada por Bohr em seu modelo, e que evidências convincentes poderiam ser encontradas nos trabalhos de Moseley. Rutherford afirmou ainda nessa carta, que Moseley demonstrou que as frequências de raios-X de vários elementos poderiam ser explicadas se o número de cargas no núcleo for igual ao número atômico e que as propriedades químicas e físicas dos átomos fossem regidas pela carga do núcleo (MEHRA, 2001).

Enquanto os trabalhos desenvolvidos por Moseley foram motivados pela existência do modelo de estrutura atômica de Bohr e Rutherford, uma outra investigação que forneceu importante correspondência empírica em favor desse modelo, parece não ter sido motivada por ele. Essa correspondência foi fornecida pelos estudos desenvolvidos por James Franck (1882-1964) e Gustav Ludwig Hertz (1887-1975). Eles estudaram a conexão entre o potencial de ionização de um gás (diferença de potencial que deveria ser aplicado a um elétron para ionizar um átomo em uma colisão), e as teorizações quânticas. Foram estimulados pelos trabalhos

²⁴ Em seus trabalhos Moseley, assim como Bohr denotavam o número atômico pela letra N. Neste trabalho usaremos a notação moderna, dada pela letra Z.

desenvolvidos anteriormente por Emil Warburg (1846-1931) ²⁵ a respeito de descargas elétricas em gases (MEHRA, 2001).

Franck e Hertz realizaram uma série de experimentos por volta de 1913, por meios dos quais obtiveram o que acreditavam ser os valores de ionização de diversos gases. Depois começaram a investigar casos específicos de colisões de elétrons livres com átomos ligados de determinados gases. Com essas investigações chegaram a resultados inesperados que foram apresentados em uma reunião da German Physical Society em Berlim, em 24 de abril de 1914 (MEHRA, 2001).

A montagem experimental do que se tornaria uma importante correspondência empírica para as hipóteses de Bohr, consistia em elétrons livres sendo emitidos de um fio de platina que eram acelerados por uma diferença de potencial aplicado entre o fio e uma rede cilíndrica. Fora dessa rede cilíndrica era fixado um outro cilindro com uma folha de platina ligado a um galvanômetro. Dessa forma, os elétrons que chegassem até a folha de platina eram detectados e a corrente elétrica poderia ser medida. Todo esse aparato era envolvido por tubo de vidro que podia ser preenchido com qualquer gás (MEHRA, 2001).

No caso dos experimentos realizados com vapor de mercúrio, Franck e Hertz observaram que a corrente detectada pelo galvanômetro aumentava continuamente até o potencial atingir um valor de 4,9 V, logo após a corrente diminuía drasticamente. Ao aumentar ainda mais o potencial aplicado, foi observado que a corrente detectada voltava a aumentar até diminuir novamente quando o potencial atingia cerca de 9,8V. Dessa forma, observaram que as quedas repentinas na corrente ocorriam em todos os múltiplos inteiros de 4,9 V, que foi denominado de potencial crítico. Além disso nos potenciais críticos ocorria a emissão de radiação de 2536 Å (MEHRA, 2001).

A interpretação desses resultados por Franck e Hertz foi elaborada tomando como base as ideias de Johannes Stark a respeito da origem das linhas espectrais discretas. Segundo Stark os espectros de linha eram relacionados ao potencial de ionização²⁶ de átomos e moléculas e a frequência de emissão de radiação ν estava relacionada com o potencial de ionização V , por meio da equação $h \nu = V$, em que h denota a constante de Planck. Dessa forma, Franck e Hertz interpretaram seus resultados acreditando que o potencial de 4,9 V proporcionava a ionização dos átomos

²⁵ Emil Warbrg havia sido professor de formação de James Franck.

²⁶ Potencial de ionização se refere ao potencial necessário para remover um elétron ligado de um átomo.

de mercúrio. A interpretação apresentada por Franck e Hertz ia de encontro com a interpretação de Bohr a respeito das linhas espectrais (MEHRA, 2001).

Ao tomar conhecimento dos resultados expressos por Franck e Hertz, Bohr apresentou uma interpretação diferente. Segundo Bohr esses resultados sugeriam fortemente que um elétron com grande velocidade (consequentemente com grande energia cinética) ao passar por um átomo e colidir com os elétrons ligados, perdem energia em quantidades discretas, ou seja, quantum de energia. Considerou que em uma colisão entre um elétron livre e um elétron ligado, o elétron ligado não poderia adquirir uma quantidade de energia inferior a diferença de energia correspondente a sucessivos estados estacionários, e consequentemente, o elétron livre que colide não poderia perder uma quantidade de energia inferior. Dessa forma, o potencial de 4,9 V do vapor de mercúrio não necessariamente representava o potencial de ionização do mercúrio, mas corresponderia apenas a transição de um estado estacionário para outro de maior energia (MEHRA, 2001).

Na época Franck e Hertz se mantiveram fiéis a interpretação baseada nas ideias de Stark, e apenas alguns anos depois levaram em consideração as ideias propostas por Bohr e finalmente concordaram com sua opinião. Em uma revisão para a *Physikalische Zeitschrift*, falaram a respeito da "confirmação da teoria atômica de Bohr por meio de investigações de colisões inelásticas entre elétrons lentos e moléculas de gás" ²⁷(FRANCK; HERTZ, 1919, p. 132 apud MEHRA, 2001, p. 369, tradução nossa). Em 1925 receberam o Prêmio Nobel de Física pela lei que rege o impacto de um elétron sobre um átomo e especialmente a confirmação das hipóteses de Bohr a respeito dos estados estacionários e a condição de frequência.

6.1.2 Arnold Sommerfeld: Condições de Quantização Adicionais

Arnold Sommerfeld se dedicou inicialmente apenas a matemática pura e trabalhou com Felix Klein (1849-1925) em Gottingen. Klein por sua vez se atentou a necessidade de aproximar a relação entre a matemática e as disciplinas teóricas e por conseguinte mudou a opinião de Sommerfeld em favor dessa ideia. Dessa forma, Sommerfeld se tornou um matemático aplicado, utilizando técnicas matemáticas na resolução de problemas de engenharia. Em 1906, Sommerfeld foi convidado a

²⁷ Tradução livre. Texto original: "confirmation of Bohr's atomic theory by investigations of inelastic collisions between slow electrons and gas molecules"

assumir o cargo de professor de Física Teórica na Universidade de Munique e ali consolidou um importante centro. Teve como assistente Peter Debye (1884-1966) que teve grande contribuição ao intensificar o interesse de Sommerfeld pelas teorizações quânticas em desenvolvimento na época (SEGRE, 1987).

Sommerfeld desenvolveu contribuições à Física Quântica desde 1911, propondo hipóteses da integralidade da ação e aplicando suas hipóteses em sistemas aperiódicos, porém suas aplicações não produziram resultados realmente conclusivos. Em 1913, incentivado pelas investigações de Friedrich Paschen (1865-1947) e Ernst Back (1881-1959) a respeito do efeito Zeeman em fortes campos magnéticos externos, Sommerfeld voltou sua atenção para o desenvolvimento de uma descrição teórica a respeito do efeito Zeeman anômalo e desenvolveu dois trabalhos com essa temática empregando argumentos quânticos apenas brevemente para a descrição das intensidades das componentes Zeeman (MEHRA, 2001).

O efeito Zeeman foi identificado em 1897 por Pieter Zeeman (1865-1943), que observou um alargamento das linhas espectrais devido a um campo magnético externo e percebeu que a borda das linhas observadas era polarizada. Ao aperfeiçoar seu aparato experimental Zeeman identificou uma divisão das linhas espectrais em dupletos ou tripletos, de acordo com a orientação relativa entre o observador e o campo magnético (SEGRE, 1987).

O efeito Zeeman, mesmo já sendo um fenômeno conhecido a mais de vinte anos (na época) continuava a ser estudado, em especial na Alemanha por Friedrich Paschen e Ernst Back entre outros. Tornou-se uma fonte de resultados precisos e de extrema relevância para a compreensão da estrutura atômica de átomos mais complexos, pois muitos átomos apresentavam padrões Zeeman bem mais complexos do que os padrões triplos ou duplos, que foram denominados de efeitos Zeeman anômalos (SEGRE, 1987).

O envolvimento com trabalhos concernentes ao efeito Zeeman, não implicava que Sommerfeld não tinha interesse pelo modelo quântico de estrutura atômica de Bohr, pelo contrário, ao receber a cópia dos trabalhos enviados a ele por Bohr, prontamente respondeu:

Muito obrigado por me enviar o seu interessantíssimo artigo, que já li na Philosophical Magazine. Há muito tempo que penso no problema de expressar a constante Rydberg-Ritz em termos da constante h de Planck. Discuti a respeito disso vários anos com Debye. Embora ainda seja um pouco cético em relação aos modelos atômicos em geral, [devo dizer que] o cálculo dessa constante representa, sem dúvida, uma grande conquista. A propósito,

o acordo numérico torna-se ainda melhor com o novo valor da constante de Planck, $h = 6,4 \times 10^{-27}$ (Sommerfeld a Bohr, 4 de setembro de 1913, apud MEHRA, 2011, p. 384, tradução nossa)²⁸.

Ao final dessa mesma carta Sommerfeld questionou se Bohr tinha planos de calcular o efeito Zeeman utilizando seu modelo. Bohr respondeu, em outra carta datada de 23 de outubro de 1913, que esperava publicar em breve uma curta nota tratando dos fenômenos de magnetismo e dos efeitos Zeeman (MEHRA, 2001).

Provavelmente devido ao ceticismo em relação aos modelos atômicos em geral, Sommerfeld não se preocupou em aplicar o modelo de Bohr ao efeito Zeeman. Entretanto utilizou o modelo de Bohr de moléculas objetivando obter uma generalização da equação de dispersão de Drude. Dessa forma, não tardou para que Sommerfeld se envolvesse profundamente com o problema da constituição atômica e conseqüentemente com o modelo de Bohr (MEHRA, 2001).

No inverno de 1914-1915 Sommerfeld anunciou um curso de palestras intitulado “Efeito Zeeman e linhas espectrais”, que se tornou um curso a respeito do modelo atômico de Bohr em que Sommerfeld apresentou também sua própria contribuição, incluindo suas hipóteses de órbitas elípticas e da estrutura fina relativística. Apesar de ter apresentado sua extensão para o modelo atômico de Bohr em suas palestras no inverno de 1914-1915, ele aguardou para publicar seus resultados, e publicou apenas no início de 1916. Isso porque, entre o outono de 1914 e o outono de 1915, o desenvolvimento da teoria da Relatividade Geral, desenvolvida por Einstein, ainda estava em curso. Sommerfeld estava muito interessado nos resultados de Einstein e não estava convicto se a nova teoria poderia mudar sua extensão relativística do modelo atômico de Bohr (MEHRA, 2001).

Por esse motivo Sommerfeld enviou um manuscrito de dois trabalhos contendo os resultados de sua extensão do modelo atômico de Bohr para Einstein, e pediu sua opinião a respeito deles. Einstein respondeu, em dezembro de 1915, que no que dizia respeito ao cálculo relativista das órbitas dos elétrons, dificilmente a relatividade geral lhe seria útil. Segundo Einstein, os resultados de Sommerfeld para esse problema

²⁸ Tradução livre. Texto original: “Many thanks for sending me your highly interesting paper, which I read already in Philosophical Magazine. Since long I have thought of the problem of expressing the RydbergRitz constant in terms of Planck’s constant h . I discussed it several years ago with Debye. Although I am still somewhat skeptical about atomic models in general, [I must say that] the calculation of that constant represents without question a great achievement. By the way, the numerical agreement becomes even better with the new value of Planck’s constant, $h = 6.4 \times 10^{-27}$ ”.

poderiam ser tratados de acordo com a teoria da relatividade especial. Muito satisfeito com a resposta de Einstein, Sommerfeld rapidamente publicou os seus artigos que apresentavam sua extensão do modelo atômico de Bohr (MEHRA, 2001).

Sommerfeld inicia o seu primeiro trabalho expondo os êxitos do modelo de Bohr em explicar o espectro do hidrogênio e dos espectros de raios-X para os elementos mais pesados, entretanto segundo ele, haveria uma lacuna quando se admitem orbitas não-circulares (no caso apresentado por ele elípticas). Afirmou ainda que preencheria essa lacuna aprofundando as hipóteses quânticas e ao mesmo tempo clarificando o caso especial relacionado ao hidrogênio (MEHRA, 2001). Considerando que o hidrogênio possuía uma única série de Balmer ²⁹, enquanto os outros elementos apresentavam uma sequência de séries (séries singleto, duplete e triplete). Sommerfeld explicou esse fenômeno sugerindo que a série de Balmer coincide com uma sequência de séries, isto é, cada uma das linhas surge de várias formas diferentes não só devido a órbitas circulares, mas também devido a órbitas elípticas de excentricidades determinadas (MEHRA, 2001).

Baseando-se em trabalhos anteriores de Planck, em especial em suas considerações a respeito do espaço de fase e as extensões referentes ao oscilador anarmônico e ao rotador, Sommerfeld concluiu que no espaço de fase teórico quântico das variáveis de momento e posição (p e q respectivamente) existiam certas células de dimensão finita, delimitadas, cujas áreas podiam ser dadas por múltiplos inteiros da constante de Planck (h). Essa condição segundo Sommerfeld podia ser expressa pela integral:

$$\iint dpdq = \int p dq = n h$$

Equação 2: Integral de fase para a quantização do momento angular.

ou seja, como uma integral de linha (MEHRA, 2001).

De acordo com as considerações supracitadas, Sommerfeld estendeu a abordagem de integração de fase para descrever também o movimento quântico teórico de sistemas com dois graus de liberdade, especialmente de elétrons em órbitas elípticas sujeitos a um campo gerado por um núcleo de carga positiva (MEHRA, 2001).

Instigado pelos resultados experimentais fornecidos pelo efeito Stark³⁰, Sommerfeld tinha consciência da possibilidade de a estrutura das órbitas ser ainda

²⁹ Nessa época ele desconsidera o espectro de linhas múltiplas, ainda pouco estudado.

³⁰ O efeito Stark se refere ao desdobramento das linhas espectrais devido a presença de um campo

mais complexa do que a considerada até o momento. Segundo ele, “de qualquer modo, quando se considera a estrutura dos átomos e a forma das órbitas dos elétrons, a restrição [do movimento] ao plano - que até agora foi alargada do átomo de hidrogênio para outros elementos - não pode ser mantida em última análise”³¹ (Sommerfeld, 1915b, p. 453, apud MEHRA, 2001, p. 389, tradução nossa).

Com o intuito de descrever as órbitas espaciais da teoria quântica, Sommerfeld aplicou a condição de quantização, expressa pela Equação 2, ao movimento azimutal do elétron, e então resultou a Equação 3, em que p_ϕ representa a componente do momento angular na direção azimutal, e ϕ o ângulo azimutal:

$$\int_0^{2\pi} p_\phi d\phi = 2\pi p_\phi = nh$$

Equação 3: Integral de fase para a quantização azimutal.

Dessa forma, interpretou que a componente do momento angular p_ϕ também deve ser quantizada assumindo valores que eram múltiplos inteiros positivos de $\frac{h}{2\pi}$ (MEHRA, 2001), em outras palavras a orientação espacial das órbitas também seria quantizada (GOMES; PIETROCOLA, 2011).

Ainda relacionado com a descrição das órbitas, Sommerfeld concluiu que se os elétrons se movem em órbitas elípticas, além das circulares ³², a excentricidade das órbitas também deveria ser quantizada, ligando-as a determinados números inteiros. Por conseguinte, Sommerfeld introduziu a integral de fase para o grau de liberdade radial, descrita pela Equação 4

$$\int p_r dr = n'h$$

Equação 4: Integral de fase para quantização radial.

Em que p_r denota a componente radial do momento, e r a distância entre o elétron e o núcleo (que varia no caso de órbitas elípticas). A partir da combinação da Equação 4 com a expressão de energia de elétrons em órbitas elípticas para o hidrogênio, Sommerfeld desenvolveu uma equação para a energia, que segundo ele,

elétrico externo.

³¹ Tradução livre. Texto original: 'At any rate, when one considers the structure of atoms and the shape of electron orbits, the restriction [of the motion] to the plane — which so far has been extended from the hydrogen atom to other elements — cannot be upheld ultimately

³² Em órbitas circulares, a excentricidade é igual a zero.

é determinada pela soma dos quanta de ação e pode ser distribuída entre as coordenadas azimutal e radial e afirmou ainda: “vejo nela [equação de energia] uma confirmação convincente da extensão da hipótese quântica à componente radial, ou da aplicação separada desta hipótese aos dois graus de liberdade do nosso problema”³³(Sommerfeld, 1915b, p. 439 apud MEHRA, 2001, p. 388, tradução nossa). Essa abordagem também derivou a equação de Bohr para o espectro de hidrogênio (MEHRA, 2001).

Importantes progressos a respeito da estrutura dos sistemas atômicos foram expressos principalmente no segundo artigo de Sommerfeld, no qual apresentou seu modelo relativista do átomo de um elétron. É importante destacar que Bohr havia tentado relacionar os fenômenos relativistas ao seu modelo, argumentando que os pequenos desvios das linhas espectrais em relação as previstas pela sua equação poderiam ser resolvidas aplicando a correção relativista da massa, ou seja, as linhas espectrais apareciam em duplas muito estreitas devido ao movimento relativista do elétron (MEHRA, 2001).

Sommerfeld por sua vez interpretou as linhas duplas observadas no espectro do hidrogênio como uma consequência das excentricidades discretas das elipses quantizadas. Então partindo da equação de movimento de um elétron relativista em um campo coulombiano proveniente de um núcleo estacionário, calculou sua energia total. Ao aplicar as condições quânticas ao movimento relativista, Sommerfeld teve que se atentar ao fato de a órbita, nesse caso não ser estacionária (ou fechada) mas que seu periélio avança após cada revolução (MEHRA, 2001).

Ao considerar a órbita não estacionária e as condições quânticas apresentadas anteriormente (Equação 3 e Equação 4), determinou a energia (W) como uma função de dois números quânticos n e n' . Assim, Sommerfeld reescreveu a equação para a energia como a expansão:

$$w = \frac{2\pi^2 m_e e^4 z^2}{h^2 (n + n')} \left[1 + \frac{\alpha z^2}{(n + n')^2} \left(\frac{1}{4} + \frac{n}{n'} + \dots \right) \right]$$

Equação 5: Equação para energia em função dos números quânticos n e n' .

³³Tradução livre. Texto original: “I rather see in it a convincing confirmation of the extension of the quantum hypothesis to the radial component, or of the separate application of this hypothesis to the two degrees of freedom of our problem”.

Em que α representa um parâmetro adimensional, dado por:

$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{h c}$$

Equação 6: Expressão para o valor do parâmetro α .

O fator numérico α , segundo Sommerfeld se torna uma quantidade fundamental para descrever a estrutura fina das linhas espectrais. Segundo o modelo relativista de Sommerfeld em um termo energético com $n + n' = 2$ ocorre um duplete devido às duas possibilidades de distribuição entre n e n' . Da mesma forma um termo em que $n + n' = 3$ seria um tripleto e assim sucessivamente. Essa relação resultaria em um número muito elevado de componentes de estrutura fina das linhas de Balmer. No entanto, Sommerfeld reduziu o número de transições possíveis por uma condição adicional, estabelecendo que os números quânticos do estado inicial tinham sempre que ser maiores ou iguais aos correspondentes do estado final (MEHRA, 2001).

O modelo de Sommerfeld logo obteve uma aplicação importante, feita por seu ex-aluno Paul Sophus Epstein (1883-1966). Epstein aplicou o modelo de Bohr-Sommerfeld para o cálculo das linhas espectrais do efeito Stark, e foi o primeiro a dar uma interpretação satisfatória, desse fenômeno com base na estrutura atômica de Bohr-Sommerfeld. Porém, a abordagem proposta por Sommerfeld a esse respeito apresentava algumas dificuldades. Epstein não considerou bem-sucedida suas tentativas em estabelecer um ponto de vista geral a respeito da possibilidade de várias órbitas. E por essa razão Sommerfeld concluiu que seria necessárias “medidas de emergência dinâmicas” para explicar as observações provenientes do efeito Stark (SOMMERFELD, 1917, p. 109 apud MEHRA,2001).

Uma correspondência empírica em favor da quantização espacial proposta por Sommerfeld, foi demonstrada em 1921 por Otto Stern e Walter Gerlach (1889-1979). Otto Stern, que buscou correspondências empíricas da quantização espacial, foi o mesmo homem citado anteriormente que prometeu abandonar a Física caso as hipóteses de Bohr a respeito da estrutura atômica estivessem corretas (SEGRÉ, 1987).

O experimento realizado por Stern e Gerlach consistiu em passar um feixe de átomos por um campo magnético não-homogêneo oriundo de um eletroímã, esses átomos poderiam ser detectados por uma placa coletora disposta na saída do

eletroímã. O arranjo experimental proposto era presumivelmente simples e possuía a vantagem de não envolver nenhuma medida espectroscópica (GOMES; PIETROCOLA, 2011). Dessa forma, observaram que os átomos identificados na placa coletora se depositavam em extremidades simetricamente opostas não sendo identificado quase nenhum átomo em posições intermediárias, ou seja, os átomos se orientavam apenas em posições descontínuas. Assim, os resultados obtidos por Stern e Gerlach demonstraram uma correspondência empírica relacionadas as hipóteses de quantização espacial de Sommerfeld (SEGRE, 1987; GOMES; PIETROCOLA, 2011).

O trabalho de Sommerfeld a respeito da estrutura atômica, foi muito apreciado e recebeu parecer muito favorável de dois importantes nomes, como por exemplo do espectroscopista Friedrich Paschen (1865-1947) e Niels Bohr. Bohr, após receber uma cópia do trabalho de Sommerfeld, escreveu: "Muito obrigado pelo seu trabalho, que é tão bonito e interessante. Acho que nunca linada que me tenha dado tanto prazer" ³⁴(Bohr a Sommerfeld, março de 1916 apud MEHRA, 2001, p. 401, tradução nossa).

Bohr, afirmou ainda a Sommerfeld que havia acabado de concluir um trabalho para publicação, em que pretendia apresentar a teoria atômica de maneira logicamente consistente, contemplando todas as aplicações e evidências empíricas existentes. Porém ao receber seu trabalho (de Sommerfeld) decidiu adiar a publicação e reconsiderar tudo, levando em conta os resultados e ideias apresentadas por Sommerfeld (MEHRA, 2001).

6.1.3 Modelo De Bohr-Sommerfeld: A Descrição Do Sistema Periódico

Nos anos seguintes a introdução do modelo atômico de Bohr em 1913, e das contribuições dadas especificamente por Sommerfeld (entre 1915 e 1916), diversos trabalhos foram publicados a respeito da estrutura atômica por diferentes cientistas. Entretanto, após regressar a Copenhague em 1916, como professor de Física teórica, Bohr tinha publicado apenas dois artigos e além desses artigos, ministrou várias palestras a respeito do progresso do seu trabalho em relação a estrutura atômica (MEHRA, 2001).

Os anos de 1918 a 1920, pareceu ser um período de baixa produção científica

³⁴ Tradução livre. Texto original: 'I thank you so much for your paper, which is so beautiful and interesting. I do not think that I have ever read anything which has given me so much pleasure'

de Bohr. Ele, por sua vez, estava fortemente envolvido na criação de seu próprio instituto, o Instituto de Blegdamsvej em Copenhague. O Instituto de Bohr, foi planejado com a ajuda de Hans Marius Hansen e financiado majoritariamente pela Fundação Carlsberg, e foi inaugurado em 3 de março de 1921. Bohr tinha vários colaboradores, dentre eles podemos citar Hendrik Anthony Kramers (1894-1952), que se tornaria o colaborador mais próximo de Bohr (MEHRA, 2001).

Kramers iniciou seus estudos a respeito de física teórica em 1912, orientado por Paul Ehrenfest (1880-1933), na Universidade de Leyden. Após ser aprovado em um exame pré-doutoral em 1916, ele desejou continuar seus estudos de Matemática e Física em uma universidade estrangeira. Entrou então em contato com Bohr por meio de cartas, e expressou o interesse em se tornar seu assistente. Bohr decidiu dar uma oportunidade a Kramers que permaneceu em Copenhague. O primeiro problema que Bohr pediu para Kramers resolver foi calcular os coeficientes de Fourier das órbitas de elétrons de átomo de hidrogênio quando perturbados por um campo elétrico externo. Nesse período, o princípio de correspondência proposto por Bohr ainda estava em curso, além disso, simultaneamente Bohr e Kramers começaram a investigar a estrutura do átomo de hélio (MEHRA, 2001).

Durante vários anos Kramers realizou investigações a respeito das intensidades das linhas espectrais, e apresentou um longo trabalho a esse respeito em 1919, como sua tese de doutoramento para a Universidade de Leyden. Em sua tese ele aplicou o princípio de correspondência ao problema das intensidades das linhas espectrais de hidrogênio, na estrutura fina e nas componentes Stark. Além de tratar desses assuntos em sua tese, Kramers também apresentou resultados detalhados em um artigo separado apresentado a *Zeitschrift fur Physik*, em outubro de 1920, em que calculou a influência de pequenos campos elétricos na estrutura fina das linhas espectrais de hidrogênio por meio do método de perturbação de sistemas periódicos de Bohr (MEHRA, 2001).

Utilizando o método de perturbação de sistemas periódicos de Bohr na influência de campos elétricos na estrutura fina, Kramers obteve os seguintes resultados. Em primeiro lugar, concluiu que para campos elétricos de baixa intensidade as correções relativísticas dos termos energéticos eram proporcionais ao quadrado da intensidade do campo elétrico, o que implica que cada componente da estrutura fina se divide em componentes Stark polarizadas. Outra conclusão obtida por ele foi que se a intensidade do campo elétrico fosse aumentada, o elétron deixaria

o plano da órbita não perturbada e um terceiro número quântico deveria ser introduzido para descrever os termos energéticos, resultado que gerou uma estrutura complicada misturando as componentes Starks com os dupletos relativistas. Por outro lado, se a intensidade do campo elétrico fosse aumentada ainda mais, o efeito Stark dominaria a estrutura da linha, ou seja, os elétrons se moveriam em um plano perpendicular ao campo elétrico que não contém o núcleo e assim os termos energéticos poderiam ser descritos por dois números quânticos, o número quântico principal e o número quântico que caracteriza o efeito Stark. Segundo Kramers, esses resultados poderiam esclarecer a compreensão dos espectros de elementos com maiores números atômicos (MEHRA, 2001).

Kramers possuía domínio do formalismo matemático e habilidade em resolver problemas complicados, por essas razões foi capaz de realizar cálculos árduos necessários para aplicar as ideias de Bohr, a respeito da estrutura atômica. Ele realizou uma avaliação detalhada a respeito dos estados energéticos do átomo de hélio, trabalhou com espectros de banda e com espectros de raios-X contínuos. Além de sua destreza em relação ao formalismo matemático, Kramers também era fluente em vários idiomas e se dispunha a ministrar palestras e aconselhar os novos estudantes. Ele aconselhou e ajudou grande parte dos recém-chegados ao Instituto Bohr no início da década de 1920, incluindo por exemplo Wolfgang Pauli (1900-1958) e Werner Heisenberg (1901-1976) (MEHRA, 2001).

Bohr considerava a colaboração de Kramers a respeito do estudo da estrutura atômica extremamente relevante, e frequentemente citava seu nome em seus trabalhos. Em uma carta datada em junho de 1920, o físico alemão Rudolf Walter Ladenburg (1882-1952), indagou Bohr a respeito de questões relacionadas a ocupação das camadas exteriores em gases nobres. Essencialmente, perguntou o que Bohr pensava a respeito da ideia de que os halogênios (Flúor, Cloro, Bromo e Iodo) ao capturarem um único elétron, assumirem a configuração estável dos gases nobres com oito elétrons na camada exterior (camada de valência). Indagou também, se Bohr concordava com essa possibilidade ou continuaria com a visão de que a estabilidade dos gases nobres ocorreria apenas com dois elétrons na camada de valência (MEHRA, 2001).

Bohr respondeu a Ladenburg, que não era possível estabelecer uma opinião definitiva a respeito das questões propostas, e afirmou que as considerações apresentadas em seus trabalhos anteriores forneciam apenas uma orientação

provisória. Visto que ainda encontrava dificuldade em explicar as propriedades químicas observadas por meio de argumentos físicos, afirmou que essa questão "depende não só do carácter geométrico da configuração, mas sobretudo das suas propriedades de estabilidade" (Bohr a Ladenburg, 29 setembro de 1920, apud MEHRA, 2001, p. 467-468).

Logo depois, Bohr iniciou uma discussão a respeito das consequências de considerar órbitas elípticas para elétrons em estado estacionário no caso dos átomos de hélio, sódio e carbono, assim como para outros elementos. Objetivava elaborar um documento pormenorizado contendo suas novas ideias a respeito da constituição atômica, entretanto, devido à sobrecarga de tarefas administrativas e por problemas de saúde que lhe acometeram durante grande parte de 1921, não conseguiu atingir o objetivo desejado (MEHRA, 2001).

Apesar de não publicar nenhum trabalho, Bohr decidiu redigir uma carta a revista *Nature*, que foi endereçada em 14 de fevereiro de 1921 e publicada em 24 de março de 1921. Segundo Mehra (2001), Bohr provavelmente encontrou incentivo para enviar essa carta a *Nature*, em uma outra carta endereçada a mesma revista pelo físico Norman R. Campbell (1880-1949), em 16 de novembro de 1920 e publicada em 25 de novembro de 1920. Nessa carta, Campbell havia comparado o modelo de Bohr-Sommerfeld com outro modelo formulado por Lewis-Langmuir (ou modelo Born-Lande) a respeito da estrutura molecular, afirmando que os modelos não pareciam ser totalmente incoerentes. Campbell afirmou ainda na referida carta, que os elétrons no modelo de Bohr-Sommerfeld não se movem realmente nas órbitas, citando o princípio de correspondência para justificar tal afirmação (MEHRA, 2001).

Bohr se opunha a todas as afirmações feitas por Campbell, e por isso decidiu elaborar uma interpretação das propriedades químicas e físicas dos elementos que corroborasse com suas interpretações dos fenômenos espectroscópicos. Portanto, posteriormente, propôs uma nova interpretação baseada no Princípio da Correspondência, em que era possível determinar a posição definitiva dos elétrons em determinadas órbitas ou camadas. Assim, segundo Bohr,

Assim, por meio de um exame mais atento do progresso do processo vincutivo, este princípio [de correspondência] oferece um argumento simples para concluir que estes elétrons estão dispostos em grupos de forma a refletir os períodos apresentados pelas propriedades químicas dos elementos dentro da sequência de números crescentes. De fato, se considerarmos a ligação de um grande número de elétrons por um núcleo de carga positiva superior, este argumento sugere que, após os dois primeiros elétrons serem ligados em órbitas de um quantum, os oito elétrons seguintes

serão ligados em órbitas de dois quantum, os dezoito seguintes em órbitas de três quantum, os trinta e dois seguintes em órbitas de quatro quantum (BOHR, 1921a, p. 105, apud MEHRA, 2001, p. 469 tradução nossa)³⁵.

Outro aspecto importante dessa interpretação proposta por Bohr, se referia ao fato já sugerido anteriormente por Alfred Landé (1888-1976), de que os elétrons de determinados grupos (ou camadas) poderiam penetrar, durante sua revolução, em regiões mais próximas ao núcleo, pertencentes a grupos de elétrons com órbitas de quantum menores. Segundo Bohr, isso levaria a um acoplamento entre elétrons de diferentes órbitas que estabeleceria "a condição necessária para a estabilidade das configurações atômicas"³⁶ (BOHR, 1921a, p. 105, apud MEHRA, 2001, p. 469, tradução nossa).

A carta de Bohr a *Nature*, contendo suas novas ideias recebeu um retorno favorável. Landé ao tomar conhecimento das ideias de Bohr, escreveu que suas ideias eram de extrema importância para o futuro dos estudos atômicos (MEHRA, 2001). Da mesma forma, considerando a importância das ideias propostas por Bohr, Sommerfeld imediatamente pretendeu utilizá-las, assim Sommerfeld pediu a seu aluno Gregor Wentzel (1898-1978) que investigasse as consequências das propostas de Bohr no estudo dos espectros de raios-X (MEHRA, 2001). Outra resposta estimulante, veio de Kasimir Fajans (1887-1975) que escreveu a Bohr: "O anúncio [em] sua carta à *Nature* da solução do enigma do sistema periódico encheu-nos de expectativas particularmente grandes"³⁷ (Fajans a Bohr, 25 de junho de 1921, apud MEHRA, 2001, p. 470, tradução nossa).

Esperava-se de Bohr a publicação de um trabalho contendo todas suas ideias e conclusões de forma detalhada, como ela havia afirmado anteriormente em sua carta a *Nature*. Porém, no lugar do esperado trabalho pormenorizado Bohr escreveu uma segunda carta a *Nature* que foi publicada em 13 de outubro de 1921. Nela Bohr

³⁵ Tradução livre. Texto original: "Thus by means of a closer examination of the progress of the binding process this principle offers a simple argument for concluding that these electrons are arranged in groups in a way which reflects the periods exhibited by the chemical properties of the elements within the sequence of increasing numbers. In fact, if we consider the binding of a large number of electrons by a nucleus of higher positive charge, this argument suggests that after the first two electrons are bound in one-quantum orbits, the next eight electrons will be bound in two-quanta orbits, the next eighteen in three-quanta orbits, the next thirty-two in fourquanta orbits".

³⁶ Tradução livre. Texto original: "the necessary condition for the stability of atomic configurations".

³⁷ Tradução livre. Texto original: "The announcement [in] your letter to 'Nature' of the solution of the riddle of the periodic system has filled us chemists with particularly great expectations".

esclareceu alguns pontos de suas abordagens anteriores e modificou alguns resultados introduzindo números quânticos diferentes nas camadas exteriores dos elétrons. A primeira vez em que Bohr fez uma apresentação completa a respeito da sua abordagem do sistema periódico, foi em suas palestras de Wolfskehl³⁸ em junho de 1922 (MEHRA, 2001).

Desde 1913, os estudos a respeito da constituição atômica de Bohr, obtiveram um considerável interesse pela comunidade científica, o que levou diversos cientistas a trabalharem com algum aspecto proposto pelo modelo de Bohr. Como citado anteriormente, Bohr não fez nenhuma publicação detalhada a respeito de seus estudos realizados após 1919, dessa forma, com o intuito de conhecer e se familiarizar com as novas ideias e abordagens de Bohr, David Hilbert (1862-1943) decidiu convidá-lo para ministrar palestras a respeito de suas novas abordagens da constituição atômica. Assim, em novembro de 1920 a Comissão Wolfskehl enviou uma carta a Bohr convidando-o para ministrar as palestras no ano seguinte (MEHRA, 2001).

Bohr aceitou o convite, mas por problemas de saúde teve que adiar o compromisso até julho de 1922. Nesse período, Bohr ministrou sete palestras, que foram planejadas cuidadosamente, pois ele sabia que muitos cientistas viriam a Gottingen para conhecer suas novas ideias e seus resultados. Assim, como esperado, cerca de 100 pessoas assistiram as palestras de Bohr e participaram do evento, que posteriormente ficou conhecido como "Festival de Bohr" (MEHRA, 2001). As palestras de Bohr foram documentadas por meio de um manuscrito datilografado que forneceu um relato do que Bohr apresentou em suas palestras. (MEHRA, 2001).

Em sua primeira palestra, ministrada em 12 de junho de 1922, Bohr apresentou suas ideias fundamentais a respeito de seu modelo de estrutura atômica, descreveu sua concepção do átomo nuclear, em que o átomo consistiria em um núcleo de cargas positivas com cargas elementares (e) positivas em torno do qual giravam os elétrons. Apresentou sua abordagem baseada em duas ideias fundamentais: a existência dos estados estacionários e a condição de emissão de radiação. Demonstrou que essas

³⁸ As palestras de Wolfskehl tiveram origem pelo matemático Paul Wolfskehl, que em 1906 entregou uma quantia de 100.000 Marcos para a Academia Real das Ciências em Gottingen, para ser oferecida como prêmio para a primeira pessoa que apresentasse uma prova completa do teorema de Fermat, durante os cem anos seguintes. Em 1908, a Comissão Wolfskehl - constituída por Ehlers, Hilbert, Klein, Minkowski, e Runge decidiram utilizar os juros proveniente desse capital para convidar cientistas para ministrarem palestras em Gottingen (MEHRA, 2001).

duas hipóteses forneciam uma descrição satisfatória para as evidências empíricas observadas nos espectros do átomo de hidrogênio e de hélio ionizado (MEHRA, 2001).

Em sua segunda palestra, em 13 de julho, apresentou uma situação contraditória no que dizia respeito aos estudos quânticos da estrutura atômica. Afirmou que apenas os conceitos desenvolvidos por teorias clássicas estavam disponíveis para descrever os fenômenos naturais observados, mas por sua vez tinha assumido que alguns pressupostos das teorias clássicas eram inválidos. Portanto abordou a possibilidade de unificar os conceitos clássicos com os conceitos do modelo quântico sem contradições. Essa situação contraditória ocasionou diversas dificuldades na elaboração de princípios quânticos, o que Bohr propôs foi aplicar os princípios em situações práticas e comparar os resultados obtidos com as observações experimentais. Seguidamente avançou para o tratamento mecânico dos sistemas atômicos e das radiações emitidas ou absorvidas, considerando o átomo como sistemas periódicos múltiplos. Descreveu esse tratamento por meio de integrais de fase de variáveis de ação, e assim demonstrou que para o limite de números quânticos elevados as frequências se aproximavam de seus valores clássicos (MEHRA, 2001). Ou seja, para grandes órbitas, a teoria clássica e o modelo quântico resultariam nos mesmos valores, essas afirmações se referiam ao “Princípio da Correspondência”, princípio em que Bohr basearia grande parte de seu trabalho (SEGRÉ, 1987).

Em sua terceira palestra, em 14 de julho, Bohr abordou diversas aplicações de suas abordagens do estudo da estrutura atômica, principalmente o princípio da correspondência e dos princípios adiabáticos. Tratou também de problemas relacionados com a influência de campos elétricos e magnéticos na estrutura fina dos espectros atômicos, chegando a resultados conhecidos incluindo os resultados de Kramers (MEHRA, 2001).

Porém, foi em sua quarta palestra ministrada em 19 de julho de 1922, que Bohr aprofundou suas discussões em seu principal problema: a elaboração de um esquema para o sistema periódico de elementos baseado em seu modelo. Obviamente, cientistas já tinham acesso nesse período a diversos dados experimentais a respeito das propriedades químicas de átomos multieletrônicos. Além disso, Lothar Meyer (1830-1895) e Dmitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907) já haviam proposto uma ordenação dos elementos em um sistema periódico mais de meio século antes.

Porém, posteriormente a essa ordenação foram identificados novos elementos e o sistema periódico foi sendo atualizado e melhorado. Ao final da segunda década do século XX, o sistema periódico continha cerca de noventa elementos que eram dispostos ordenadamente conforme a ordem crescente de seus números atômicos em sete períodos (MEHRA, 2001).

Logo que a comunidade científica tomou conhecimento do modelo de Bohr e do modelo de Bohr-Sommerfeld a respeito da constituição atômica, houve tentativas de fornecer uma explicação do sistema periódico baseado nesses modelos. Como por exemplo, Walther Kossel (1888-1956) que analisou as propriedades químicas dos átomos como apresentados na constituição das moléculas, Lars Vegard (1880-1963) que realizou uma análise detalhada de espectros de raios-X, além da questão da existência de mais de oito elementos, nos conhecidos períodos longos levantada por Rudolf Ladenburg (1882-1952). Bohr acompanhava essas tentativas atentamente, mas apenas após o desenvolvimento do Princípio da Correspondência se sentiu preparado para apresentar sua própria abordagem a respeito do tema (MEHRA, 2001).

Ele baseou sua abordagem no que ele chamou de “Princípio de Construção”, que consistia na hipótese de que a estrutura de um átomo poderia ser determinada por meio de sucessivas ligações do elétron ao núcleo. Dessa forma, “os números quânticos e os pesos estatísticos dos elétrons já ligados permaneciam invariantes com a adição de um elétron exterior durante o processo de construção de elementos químicos” (MASSIMI, 2004, p. 250). Considerando esse princípio, Bohr deu preferência a formulação do sistema periódico elaborada anteriormente por Julius Thomsen (1826-1909) pelo fato de considerar sua formulação mais bem adaptada ao seu objetivo (MERHA, 2001).

O sistema periódico proposto por Julius Thomsen, ordenava os elementos em grupos horizontais e períodos verticais, Bohr apresentou e tentou justificar esse esquema em sua quarta palestra, em 19 de junho de 1922. Bohr explicou em parte os espectros alcalinos, se baseando na interpretação de Sommerfeld, em que a estrutura de dupletos dos espectros alcalinos decorriam do fato do núcleo atômico possuir simetria axial o que daria origem a um termo de perturbação provenientes das duas orientações permitidas do núcleo versus a órbita do elétron. Bohr apresentou nessa palestra os cálculos provenientes do átomo de hélio, por meio da perturbação mútua dos dois elétrons, um sobre o outro (MEHRA, 2001).

Os cálculos apresentados na quarta palestra de Bohr tinham se tornado demasiadamente complicados, porém ele argumentou que estes se tornariam menos complicados para os elementos com números atômicos superiores. Dessa forma, em sua quinta e sexta palestra, abordou todos os elementos do segundo ao sétimo período. Bohr argumentou que a estrutura em duplete das linhas espectrais do lítio surgiam em decorrência do núcleo possuir o momento angular 1 (em unidades de $\frac{h}{2\pi}$) que somado ao momento angular do elétron fornecia o momento angular total (acoplamento elétron-núcleo) (MASSIMI, 2004) igual a 2 no caso do estado fundamental, além de mais dois momentos angulares possíveis no caso do estado p . Dessa forma, apresentou uma interpretação para a natureza de singleto do estado s , e a de duplete do estado p , entretanto admitiu que seu argumento ainda era muito incerto. Mencionou também o modelo de Werner Heisenberg para a descrição dos espectros do efeito Zeeman anômalo, afirmando que esta era uma tentativa muito promissora, porém difícil de justificar por envolver números quânticos semi-inteiros³⁹ (MEHRA, 2001).

Bohr concluiu ainda que o elemento de número atômico 72, ainda não identificado, deveria ter propriedades químicas similares às do zircônio e não às das terras raras⁴⁰. Ao final de sua sexta palestra Bohr chamou atenção para o fato dos seus resultados e hipóteses ainda estarem incompletos e incertos (MEHRA, 2001).

Em sua sétima e última palestra, em 22 de junho de 1922, Bohr retornou a discussão em relação a estrutura atômica, debatendo principalmente os resultados relacionados aos espectros de raios X. Antes de apresentar sua própria interpretação a esse respeito, Bohr apresentou rapidamente o desenvolvimento das interpretações concernentes aos espectros de raios X, desde os trabalhos de Moseley de 1913, referindo-se também aos trabalhos de Kossel, à interpretação de Sommerfeld da estrutura fina e às seguintes investigações de Sommerfeld e Vegard, assim como aos estudos mais recentes de Dirk Coster (1889-1950) e Wentzel, que analisaram a complexidade dos níveis envolvidos na emissão de espectros de raios X (MEHRA, 2001).

Dirk Coster, a partir de dados empíricos provenientes de espectros de raios X,

³⁹ Trataremos do modelo proposto por Werner Heisenberg detalhadamente mais adiante.

⁴⁰ Atualmente família das terras raras é constituída por elementos que pertencem na tabela periódica atual ao grupo dos lantanídeos.

mais especificamente das camadas L e M de elementos mais pesados conseguiu organizar todos os níveis, K, L e M, identificando que havia um nível K, três níveis L e cinco níveis M, e essa organização se baseava nas hipóteses de Bohr da constituição atômica (MEHRA, 2001).

Por outro lado, Gregor Wentzel em seus estudos estimulados por Sommerfeld, tinha sugerido uma organização diferente, introduzindo um terceiro número quântico, além do azimutal e radial, que ele denominou número quântico fundamental e era denotado pela letra m . Em colaboração com Sommerfeld, Wentzel distinguiu as linhas espectrais de raios X em dois grupos, a saber: os regulares e os irregulares. Segundo Sommerfeld e Wentzel os dupletos regulares eram caracterizados por uma variação constante de comprimento de onda enquanto os irregulares eram caracterizados por variações constantes das raízes quadradas das frequências. Bohr concordava com resultados recentes obtidos e concordou com a introdução do terceiro número quântico em sua descrição, mas não quis associá-lo ao movimento do elétron em si, e afirmou que o terceiro número quântico dizia respeito apenas com a orientação das órbitas (MEHRA, 2001).

Após apresentar o desenvolvimento e o panorama atual a respeito dos dados empíricos e resultados de estudos de espectroscopia de raios X, Bohr terminou seu ciclo de palestras de Wolfskehl. Em suas palestras buscou apresentar ao público presente suas ideias mais recentes da estrutura atômica, entretanto, apesar do otimismo demonstrado em suas palestras, não escondeu a incerteza em várias conclusões e enfatizou o importante papel dos dados empíricos na construção do modelo das órbitas dos elétrons, que segundo ele “uma grande quantidade de material experimental contribuiu para a formação da nossa visão. É uma questão de gosto, creio eu, se colocar a ênfase principal nas considerações gerais ou nos fatos empíricos nus”⁴¹(BOHR, 1977, p. 397, apud MEHRA, 2001, p. 483, tradução nossa).

Durante as palestras, contendo os assuntos supracitados, foi reservado um tempo para discussões abertas e muitas pessoas em especial Sommerfeld e Pauli participaram ativamente delas. Sommerfeld, por exemplo apresentava um certo ceticismo em relação ao Princípio de Correspondência, e Bohr ainda não conseguiu responder todas suas perguntas efetivamente nessa ocasião. No entanto, em geral

⁴¹ Tradução livre. Texto original: 'A large amount of experimental material has contributed to the shaping of our view. It is a matter of taste, I believe, whether to put the main emphasis on the general considerations or on the bare empirical facts'

todos ficaram impressionados com Bohr e a forma com que ele expressou suas ideias e como havia chegado à explicação do sistema periódico (MEHRA, 2001).

A repercussão e o êxito das considerações recentes de Bohr, em breve seriam notadas pelos anfitriões de Bohr em Gottingen e pelo próprio Bohr. Apesar de sua abordagem para explicar o sistema periódico não ter sido a primeira, ela causou impressões mais profundas nos físicos que trabalharam com a estrutura atômica. Assim sendo, Albert Einstein, que não participou do ciclo de palestras de Wolfskehl, escreveu a Bohr a partir da sua viagem ao Japão: "As suas recentes investigações a respeito do átomo acompanharam-me na minha viagem e aumentaram ainda mais a minha admiração pela sua mente" ⁴² (Einstein a Bohr, 11 de janeiro de 1923, apud MEHRA, 2001, p.485, tradução nossa).

O sucesso obtido pelas recentes considerações de Bohr motivou Sommerfeld a rever e mudar sua opinião em relação ao Princípio de Correspondência, que Bohr utilizou como princípio norteador na época. Por esse motivo, Sommerfeld aplicou o princípio de correspondência em dois documentos escritos em colaboração com seu aluno Werner Heisenberg que foram publicados em agosto de 1922. Nesses documentos Sommerfeld e Heisenberg discutiram a relação entre os dupletos de raios X relativistas e as intensidades das linhas espectrais e chegaram a resultados coerentes com as opiniões de Bohr. Eles trataram também das intensidades das componentes Zeeman, seguindo a abordagem de Bohr relacionado ao efeito magnético nas linhas espectrais, chegando novamente em uma descrição satisfatória do efeito Zeeman. Porém nos anos seguintes novas dificuldades surgiram em tentativas de explicar fenômenos como a complexa estrutura do efeito Zeeman anômalo, os estados energéticos do átomo de hélio e o efeito Compton (MEHRA, 2001).

A explicação do sistema periódico dos elementos, proposta por Bohr, atingiu um grande êxito ao final de 1922, com a identificação do elemento de número atômico 72 (MEHRA, 2001; SEGRÉ, 1987). A tabela periódica dos elementos que Bohr apresentou em suas palestras em Wolfskehl não continha os elementos de números atômicos 43, 61, 72, 75, 85 e 87. As propriedades químicas e físicas desses elementos exceto o elemento de número atômico 72, pareciam ser evidentes. As propriedades

⁴² Tradução livre. Texto original: 'Your recent investigations on the atom have accompanied me on my travel and have further increased my admiration for your mind'

do elemento de número atômico 72, situado próximo aos elementos terras raras apresentava algumas dificuldades. De acordo com Bohr esse elemento deveria ter propriedades semelhantes ao zircônio e não a elementos terras raras (MEHRA, 2001; SEGRÉ, 1987).

As tentativas de identificar o elemento de número atômico 72, havia começado em 1907, quando Georges Urbain (1872-1938) após vários anos de trabalho anunciou a identificação de um novo elemento de terras raras, que na época deu o nome de *celtium*, e atribuiu a ele o número atômico 72. Em 1914, Urbain, pediu para Moseley que investigasse o espectro de raios X da substância, que presumia conter o elemento de número atômico 72. Moseley, no entanto, não conseguiu identificar os espectros de raios X característicos do referido elemento. Apesar das pesquisas malsucedidas de Moseley, Urbain continuou a acreditar na existência do elemento *celtium* (MEHRA, 2001; SEGRÉ, 1987).

Um novo avanço em relação a identificação do elemento de número atômico 72 ocorreu em 1922, quando Alexandre Dauvillier (1892-1979), que era assistente-chefe do laboratório de Maurice De Broglie (1875-1960), relatou que por meio de medidas do espectro de raios X de uma amostra contendo os elementos conhecidos ytterbium e lúteo, observou além das linhas espectrais características desses dois elementos, duas linhas fracas que atribuiu ao elemento de número atômico 72, e dessa forma concluiu a existência do *celtium*, como um elemento de terras raras. Rutherford, que tinha muito interesse pela questão da identificação do *celtium* desde 1914, foi informado a respeito dos resultados obtidos por Dauvillier e relatou os seus principais resultados em uma carta enviada a *Nature*, que foi publicada em 17 de junho de 1922 (MEHRA, 2001).

Bohr tomou conhecimento do conteúdo da carta de Rutherford à *Nature* no final de junho após regressar de Copenhague, e se preocupou profundamente pelos resultados por ela expressos, pois havia declarado durante suas palestras na conferência Wolfskehl que o elemento de número atômico 72 deveria ter propriedades semelhantes ao zircônio e não às terras raras. Bohr chegou a admitir que suas afirmações estavam erradas e apresentou uma outra explicação teórica que fosse coerente com os resultados obtidos por Dauvillier (MEHRA, 2001).

Porém Bohr não estava convencido com essa explicação e escreveu uma carta a Dirk Coster, que ele julgava um especialista em espectroscopia de raios X, e pediu sua opinião a respeito da confiabilidade dos resultados de Dauvillier. Coster

respondeu a Bohr que o trabalho de Dauvillier não havia lhe convencido e afirmou:

Conhece a minha opinião a respeito desse autor. Os seus artigos são uma mistura de coisas muito boas e muito más e é sempre impossível confirmar as suas declarações ⁴³ (Coster a Bohr, 15 de julho de 1922 apud MEHRA, 2001, p.492, tradução nossa).

Contudo, já no dia seguinte Coster recebeu o parecer de Marine Siegbahn (1886-1978), que durante uma visita a Paris tinha visto as placas fotográficas de Dauvillier, e se encontrou com Coster em 16 de julho de 1922. Nesse encontro Siegbahn lhe disse que não confiava totalmente no trabalho e nos resultados de Dauvillier, opinião que Coster prontamente reportou a Bohr (MEHRA, 2001).

Coster redigiu uma carta que endereçaria a revista *Nature*, em que argumentava contra os resultados de Dauvillier, no entanto, Bohr que havia recebido uma cópia anteriormente, sugeriu a Coster não publicar pois pareceria muito polêmica e especulativa. Em contrapartida, informou em particular Rutherford a respeito das dúvidas de Coster, Siegbahn e ele mesmo a respeito da existência do *celtium*, e decidiu convidar Coster para trabalhar em Copenhague e realizar uma análise a respeito dos espectros de raios X e sua relação com a estrutura atômica (MEHRA, 2001).

Coster aceitou o convite e começou a trabalhar com Bohr em setembro de 1922, e logo ao final de outubro já haviam concluído um trabalho intitulado “Rontgenspektren und periodisches System der Elemente” (Espectros de raios X e sistema periódico dos elementos) que foi publicado em 12 de janeiro de 1923 pela revista *Zeitschrift fur Physik*. Nele Bohr e Coster apresentaram uma discussão a respeito de todos os dados de raios X disponíveis até o momento. Em uma série de outros trabalhos, apresentaram suas medidas das frequências de difração de raios X de diversos elementos e mostraram os resultados por eles obtidos. A análise de Coster e Bohr tinha como objetivo sofisticar a classificação de níveis energéticos que Coster havia feito anteriormente e determinar com clareza a questão da ocupação da camada de elétrons do elemento de número atômico 72 (MEHRA, 2001).

Em seus trabalhos, Bohr e Coster ordenaram os níveis de energia do mais baixo para os mais altos, obtidos a partir dos espectros de raios X, ou seja, ordenaram

⁴³ Tradução livre. Texto original: “You know my opinion about this author. His papers are a mixture of very good and very bad things and it is always impossible to check his statements”.

os níveis K, os três níveis L, os cinco níveis M, os sete níveis N, os cinco níveis O e os três níveis P. Posteriormente associaram cada termo a três números quânticos a saber $n (K_1, K_2)$. No qual n era o número quântico principal, relacionado aos níveis de energia (isto é, $n = 1, 2, 3$ para L, M, N... etc.); K_2 representava o número quântico azimutal e K_1 representava o número quântico adicional que assumia valores iguais a K_2 ou $K_2 + 1$. Por exemplo o nível K era descrito pelos números quânticos 1 (1,1), os três níveis L por 2 (1, 1) para L_I, 2(2,1) para L_{II} e 2(2,2) para L_{III}. Considerando essa organização as transições que originaram as linhas espectrais de raios X obedeceram às seguintes regras de seleção:

$$\Delta_n = 1, 2, 3 \dots \quad \Delta_{k_1} = 1, \dots \quad \Delta_{k_2} = 0, 1.$$

Equação 6: Regras de seleção obtidas nas linhas espectrais medidas por Bohr e Coster.

Outro fato importante foi que Bohr e Coster observaram que a nova organização proposta por eles, era equivalente a organização proposta anteriormente por Gregor Wentzel, sendo necessário apenas identificar os números quânticos m e n , propostos por Wentzel por K_1 e K_2 respectivamente. Entretanto sugeriram uma interpretação física distinta, e explicaram a diferente natureza dos espectros ópticos dos espectros de raios X da seguinte maneira:

Assim, a periodicidade típica das propriedades químicas e dos espectros ópticos depende da circunstância de, para as órbitas dos elétrons mais exteriores, os números quânticos efetivos, em contraste com os números quânticos principais, variarem pouco à medida que se passa de um elemento para o elemento homólogo no período seguinte no sistema de elementos. Por outro lado, a surpreendente falta de periodicidade das características essenciais dos espectros de raios X depende da circunstância de estarmos aqui principalmente preocupados com as condições dos elétrons mais internos do átomo, que se movem em grupos já completamente formados e que se repetem inalterados em todos os elementos subsequentes (Bohr; Coster, 1923, p. 357; Bohr, Collected Works, Volume 4, 1977, p. 534 apud MEHRA, 2001, p. 494, tradução nossa)⁴⁴.

Bohr e Coster calcularam os termos energéticos em função dos três números quânticos. Eles não entraram em detalhes aos problemas de cunho teórico e limitaram-se a investigar a dependência dos dados de termos empíricos para

⁴⁴ Tradução livre. Texto original: "Thus, the typical periodicity of the chemical properties and of the optical spectra depends on the circumstance that, for the outermost electron orbits, the effective quantum numbers, in contrast to the principal quantum numbers, vary only little as one goes from an element to the homologous element in the next period in the system of elements. On the other hand, the striking lack of periodicity of the essential features of X-ray spectra depends on the circumstance that we are here primarily concerned with the conditions of the innermost electrons in the atom, which move in groups that are already completely formed and that repeat themselves unchanged in all subsequent elements".

determinados conjuntos dos três números quânticos, $n (K_1, K_2)$. com os números atômicos. Com essa finalidade traçaram os valores da quantidade T/R (em que T se relaciona com o nível de energia) em função de Z. A constatação mais importante que Bohr e Coster fizeram ao examinar as curvas plotadas foi que elas apresentavam descontinuidades exatamente nos locais em que, de acordo como as hipóteses de Bohr, uma camada interna de elétrons era completada. Por exemplo, essas descontinuidades apareceram nitidamente no início e no final do grupo de elementos de terras raras, especialmente nos níveis de energia N, ou seja, entre os números atômicos 56 e 58 a inclinação mudou repentinamente de um valor maior para um valor menor até que todas as órbitas de quatro quantum estivessem ocupadas, e somente depois a inclinação voltou a ser mais acentuada. Mas lamentavelmente não foi possível identificar claramente a partir dos dados dos raios X, o número atômico em que a inclinação mais acentuada começou. Devido a esse fato a questão relativa ao elemento 72 e suas propriedades químicas permaneceu sem respostas na época (MEHRA, 2001).

Essa questão seria respondida em breve com a identificação do elemento háfnio, em 11 de dezembro de 1922. Alguns minutos antes de seu pronunciamento Nobel Bohr recebeu um telefonema de Coster, que relatou a Bohr que havia identificado a presença do háfnio em sua chapa fotográfica. Bohr mencionou a notícia do novo elemento identificado na última parte de sua palestra, e afirmou:

Nestas circunstâncias, o Dr. Coster e o Professor Hevesy, que estão ambos a trabalhar em Copenhague, ocuparam-se há pouco tempo do problema de testar uma preparação de minerais com zircônio através da análise espectroscópica por raios X. Estas investigações permitiram estabelecer a existência nos minerais investigados de quantidades significativas de um elemento com número atômico 72, cujas propriedades químicas revelam uma grande semelhança com as do zircônio e uma diferença decidida em relação às das terras raras (Bohr, 1923b, p. 42, apud MEHRA, 2001, p. 496, tradução nossa).

A identificação do elemento háfnio com as propriedades previstas, constituiu um grande êxito para Niels Bohr. Entretanto, ainda havia alguns fenômenos cujas soluções teóricas permaneciam pendentes, como o problema do hélio e o efeito Zeeman anômalo.

6.1.4 Modelo Do Núcleo Atômico

Entre os anos de 1921 e 1924, o modelo teórico mais aceito e usado por cientistas para descrever os padrões espectrais observados foi o chamado “modelo de núcleo atômico”. De acordo com esse modelo o núcleo atômico, composto pelo núcleo e as camadas eletrônicas completas, possuía um momento angular não nulo que se acoplava ao momento angular orbital dos elétrons de valência e, portanto, resultariam nos padrões de espectros observados (MASSIMI, 2004).

No entanto, alguns fenômenos espectroscópicos observados não puderam ser explicados utilizando o modelo do núcleo atômico, dentre esses fenômenos podemos citar a estrutura de dupletos dos átomos alcalinos e suas componentes Zeeman. Os espectros dos átomos alcalinos (Lítio, Sódio, Potássio, Rubídio e Césio)⁴⁵ apresentavam dupletos, supunha-se que os dupletos observados eram oriundos de uma diferença de energia devido a divisão de cada estado de momento angular orbital, ou seja, associado ao número quântico azimutal K . Uma análise a respeito da estrutura fina de espectros de raios- X, realizada anteriormente por Sommerfeld, indicou que os elétrons responsáveis pela emissão dos raios X sofriam um aumento relativista de massa em decorrência da diferença do momento angular orbital das duas órbitas (órbitas entre as quais o elétron “saltou”). Essa diferença de momento angular orbital foi considerada na ocasião uma explicação satisfatória para a estrutura de dupletos observada na estrutura fina de espectros de raios X (MASSIMI, 2004).

No início da década de 1920, houve tentativas de ampliar a explicação da estrutura de dupletos de raios X para explicar a estrutura dos espectros ópticos. Entretanto, os níveis energéticos responsáveis pela estrutura de dupletos dos átomos alcalinos apresentavam o mesmo momento angular orbital, dessa forma não foi possível unificar as explicações teóricas dos dupletos de raios X e os dupletos dos átomos alcalinos (MASSIMI, 2004).

Segundo o modelo do núcleo atômico, os multipletos ocorriam devido ao acoplamento núcleo-elétron, em que os subníveis de energia emergiam de diferentes orientações do vetor momento angular orbital do elétron de valência (\mathbf{K}) em relação ao suposto vetor momento angular atribuído ao núcleo (\mathbf{R}). Dessa forma o vetor \mathbf{K} e

⁴⁵ Nesse período o elemento Frâncio ($Z= 87$) ainda não havia sido identificado.

\mathbf{R} se acoplavam totalizando o momento angular total do átomo (\mathbf{J})⁴⁶, que de acordo com a condição de quantização espacial de Sommerfeld, podiam assumir apenas algumas orientações discretas (em unidades múltiplas de $\frac{h}{2\pi}$), que eram devidamente associadas as componentes de multipletos observados (MASSIMI, 2004).

Embora o modelo do núcleo atômico tenha tido sucesso em sua correspondência empírica, alguns resultados apontavam para algumas dificuldades enfrentadas por ele. A primeira dificuldade observada, foi que a partir desse modelo foi possível obter apenas termos espectrais de multipletos ímpar (ou seja singletos e tripletos) e não de multipletos pares (por exemplo dupletos e quadrupletos). Outra dificuldade digna de destaque foi que modelo do núcleo atômico contradizia o “Princípio de Construção” proposto por Bohr, em que os números quânticos e os pesos estatísticos deveriam permanecer invariantes durante o processo de construção. Foi identificado, no entanto, um decréscimo em unidades semi-inteiras nos pesos atômicos (MASSIMI, 2004).

Outro fenômeno observado que não correspondia com as explicações fornecidas pelo modelo do núcleo atômico, foi o efeito Zeeman anômalo. Os dupletos dos metais alcalinos, na presença de um campo magnético externo se dividiam em um quadrupletos e sextupletos. Padrões anômalos semelhantes também foram identificados em espectros de outros elementos. Instigado por esses fatos Alfred Landé, em 1921, elaborou uma equação para o cálculo da energia dos estados Zeeman, que pode ser representada pela equação 7,

$$W = W_0 + m g h \nu_L$$

Equação 7: Equação de energia das componentes Zeeman elaborada por Landé.

em que W representa o valor da energia do estado Zeeman, W_0 representa a energia do estado sem a presença do campo magnético externo, m o número quântico magnético, ν_L a frequência de Larmor e g ficou conhecido como fator g de Landé, que foi introduzida com base exclusivamente empírica (MASSIMI, 2004).

Baseado no modelo do núcleo atômico, Landé definiu o fator de divisão Zeeman $m g$, como a soma das projeções dos vetores \mathbf{R} e \mathbf{K} no vetor do campo

⁴⁶ Fazendo uma análise anacrônica, o modelo do núcleo atômico pode ser considerado empiricamente equivalente ao acoplamento spin-órbita dos modelos semi-clássicos posteriores.

magnético externo (H), em que R e K sofriam uma precessão de Larmor em torno do vetor campo magnético externo (H). Entretanto, Landé observou que os resultados obtidos não condiziam com o teorema de Larmor, pois esse teorema estabelecia que na presença de um campo magnético externo as órbitas dos elétrons precessam ao redor da direção do campo magnético externo com a frequência de Larmor ⁴⁷, entretanto Landé observou que R precessava duas vezes mais rápido do que K , ou seja, apresentava o dobro do valor esperado pelo teorema de Larmor (MASSIMI, 2004).

Apenas por meio de hipóteses auxiliares ou hipóteses *ad hoc*, esses fenômenos supracitados puderam ser explicados coerentemente com o modelo do núcleo atômico, como a hipótese de restrição não- mecânica no acoplamento núcleo-elétron (proposto por Bohr), a hipótese de partilha do momento angular orbital do elétron de valência com o núcleo (Princípio de Partilha) ou a hipótese em que o momento angular do núcleo se ramificaria em dois autovalores durante o acoplamento com o momento angular orbital do elétron de valência (Regra de Ramificação). Apenas Wolfgang Pauli introduziu uma nova hipótese abandonando o modelo de núcleo atômico (MASSIMI, 2004).

Em 1922, Heisenberg elaborou uma hipótese, também baseada no modelo do núcleo atômico para explicar os dupletos da estrutura dos átomos alcalinos, que ficou conhecida como “Princípio da Partilha”. Segundo essa hipótese o elétron de valência deveria partilhar metade do seu momento angular com o núcleo, que inicialmente não possuía momento angular, dessa forma o número quântico do momento angular orbital K assumia valores semi-inteiros, enquanto o núcleo se apropriava de meio-quantum do elétron de valência e seu momento angular passava a assumir o valor $\frac{1}{2}$ (MASSIMI, 2004). Dessa forma, o vetor de momento angular orbital do elétron (K) deveria se mover em torno do vetor de momento angular do núcleo (R) de forma que um campo magnético interno (H_i) fosse criado e núcleo precessaria ao redor de H_i . Na presença de um campo magnético externo (H), o núcleo deveria então precessar ao redor do vetor resultante $H_i + H$ (MASSIMI, 2004).

A partir da hipótese do “Princípio da Partilha” e utilizando propriedades geométrico-mecânicas, Heisenberg pode fornecer uma explicação do efeito Paschen-

⁴⁷ A frequência de Larmor era dada por $L = eH^2\pi mc$, em que H representa a intensidade do campo magnético externo, e a carga do elétron, m a massa do elétron e c a velocidade da luz.

Back e do efeito Zeeman anômalo. Contudo esse modelo enfrentou uma importante dificuldade de cunho teórico, a saber, para campos externos intermediários o vetor momento angular do núcleo permanecia invariável na direção do vetor resultante $H_i + H$, sem precisar, fato que ia de encontro com o Teorema de Larmor, por esse motivo o momento angular total do átomo não seria quantizado de acordo com a quantização espacial. Além disso, ao atribuir valores semi-inteiros ao número quântico de momento angular orbital (\mathbf{K}) violou as condições quânticas de Bohr-Sommerfeld que admitiam apenas números quânticos inteiros (MASSIMI, 2004).

Devido as evidências empíricas que divergiam do previsto pelo Princípio de Construção, Bohr apresentou uma hipótese teórica na tentativa de explicar essas discrepâncias tomando como base o modelo do núcleo atômico. Ele propôs a hipótese de “Restrição não-mecânica”, em que fixou os valores do então denominado número quântico do momento angular total do átomo (\mathbf{J}) para os dupletos (em que $K=2$), iguais a $K + d$ e $K + d - 1$, já para os estados com estrutura de singleto, em que $K = 1$, o número quântico de momento angular total assumia o valor $J = 1 + d$. A quantidade d apresentada nessa hipótese é independente de K , e sua interpretação física não foi determinada, mas por questões de simetria a quantidade d assumiu o valor $\frac{1}{2}$ (MASSIMI, 2004).

Dessa forma, foi assumido que os valores semi-inteiros de J (módulo de \mathbf{J}), eram devido a soma de K com a nova quantidade, ainda não determinada d . O valor de d foi empiricamente determinada para se ajustar as evidências experimentais. Com a hipótese da Restrição não-mecânica foi possível derivar os dupletos alcalinos e sua divisão Zeeman, mantendo-se coerente com o Princípio de Construção (MASSIMI).

Em 1923, Landé, que continuou seus estudos e pesquisas a respeito do efeito Zeeman, e desenvolveu equações semi-empíricas que descreviam os efeitos Zeeman normal e anômalo com muita acuidade. Porém seus resultados se tornaram de difícil compreensão considerando os modelos teóricos conhecidos e discutidos na época (SEGRÉ, 1987).

Em 1924 Landé e Heisenberg apresentaram outra hipótese denominada “Regra da Ramificação”, em que o momento angular total do átomo estava unicamente associado a dois autovalores $J + \frac{1}{2}$ e $J - \frac{1}{2}$. Essa regra era consistente com o Princípio de Construção, porém não era eficaz em explicar o efeito Zeeman anômalo (MASSIMI, 2004).

Devido a essas dificuldades teóricas, Landé e Heisenberg, introduziram o chamado “acoplamento magnético”, em que consideravam que a divisão em estruturas múltiplas das linhas espectrais observadas tinha origem em uma interação entre o momento magnético do núcleo atômico com o campo magnético “interno”, proveniente dos elétrons de série orbital. Consideravam, portanto, que o núcleo do átomo se comportava como um ímã elementar. Levando em conta essas considerações a respeito do átomo de vários elétrons foi possível descrever satisfatoriamente os dados empíricos observados, relativos as estruturas de multipletos e os efeitos anômalos (MEHRA, 2001).

Entretanto essas considerações apresentavam consequências indesejáveis, a saber, a relação entre o momento magnético e o momento magnético “interno”, tinha que ser considerado como sendo duas vezes maior do que na Teoria eletrodinâmica, ou seja, o fator giromagnético era $g = 2$; além disso para a interpretação e sistematização dos dados empíricos era necessário a utilização de números quânticos semi-inteiros (MEHRA, 2001).

Porém, desconsiderando esses aspectos desagradáveis, o modelo de acoplamento magnético foi capaz de orientar a elaboração de equações para a caracterização da intensidade das linhas de estruturas múltiplas e de seus respectivos componentes Zeeman, os resultados dessas equações se ajustaram perfeitamente aos dados empíricos obtidos (MEHRA, 2001).

6.1.5 O Princípio De Exclusão

Em 1918, Wolfgang Pauli na época com dezoito anos, deixou a cidade de Viena para estudar Física com Sommerfeld em Munique. Ele rapidamente se interessou pelos problemas da estrutura atômica, concluindo seu doutorado em 1921 com uma tese a respeito da molécula de hidrogênio ionizada (MEHRA, 2001).

Pauli considerava as questões relacionadas com a distribuição dos elétrons no átomo, um ponto importante para o desenvolvimento dos estudos atômicos. Estava ciente, entretanto, que as hipóteses a respeito do sistema periódico apresentado por Bohr não forneciam de forma consistente argumentos explicativos concernentes a essas questões (MEHRA, 2001). Em uma carta endereçada a Sommerfeld em junho de 1923, Pauli expressou sua opinião a respeito das fragilidades do sistema periódico proposto por Bohr, e afirmou que "a fraqueza da teoria é, não fornecer qualquer

explicação para os valores 2, 8, 18, 32,... da duração dos períodos, porque não se pode tirar conclusões definitivas sobre o local exato em que os períodos estão encerrados"⁴⁸ (Pauli a Sommerfeld, 6 de junho de 1923 apud MEHRA, 2001, p. 571, tradução nossa).

Na concepção de Pauli a fraqueza acima citada, a respeito do sistema periódico proposto por Bohr, além das inconsistências observadas nos espectros dos átomos alcalinos e o no efeito Zeeman anômalo, que não eram explicados com base nos princípios fundamentais do modelo de Bohr-Sommerfeld. Por esse motivo acreditava que ideias inovadoras eram necessárias. Pauli permaneceu instigado por essas questões e pensou em como avançar após deixar Copenhague e regressar a Universidade de Hamburgo, onde logo foi promovido a *Privatdozent*⁴⁹ e ministrou sua primeira palestra após a promoção a respeito do sistema periódico dos elementos (MEHRA, 2001).

Em 1922, a convite de Bohr, Pauli foi a Copenhague para ajudar com a edição alemã das longas memórias de Bohr a respeito da estrutura atômica. Segundo Mehra (2001) esse convite foi apenas uma desculpa para trazer Pauli a Copenhague, a bem da verdade Bohr precisava de Pauli para ajudá-lo a solucionar diversos problemas difíceis a respeito da estrutura atômica, entre eles o efeito Zeeman anômalo. Durante sua estadia em Copenhague, como lembrou Pauli anos mais tarde, um amigo o viu sentado em um banco de jardim em Copenhague e lhe disse: "Parece muito infeliz", ao que respondi veementemente: "Como se pode parecer feliz quando se pensa no efeito Zeeman anômalo?"⁵⁰ (MEHRA, 2001, p. 645, tradução nossa).

Ao fim de 1923, Pauli se afastou do problema do sistema periódico e se ocupou com o problema referente a condução de calor em corpos sólidos. Em uma carta a Bohr em fevereiro de 1924, relatou que não havia tido progresso em seus estudos a respeito da estrutura atômica, devido ao seu trabalho com a condução de calor, mas que pretendia concluí-lo e ainda declarou: "De qualquer modo, foi muito bom para mim que eu tenha deixado a teoria atômica durante algum tempo. Mais tarde, talvez muito

⁴⁸ Tradução livre. Texto original: 'The weakness of the theory is 'that it does not provide any explanation for the values 2, 8, 18, 32,... of the length of periods, because one cannot derive definite conclusions as to where exactly the periods are closed'.

⁴⁹ Conferencista. Título universitário de professores que receberam a habilitação de docência, mas não possuíam a cátedra de ensino ou pesquisa.

⁵⁰ "You look very unhappy," whereupon I answered fiercely, "How can one look happy when he is thinking about the anomalous Zeeman effect?"

em breve, voltarei a ela com novas forças”⁵¹(Pauli a Bohr, 11 de fevereiro de 1924 apud MEHRA, 2001, p.572, tradução nossa). Ainda nessa carta, se referiu aos problemas relacionados ao efeito Zeeman anômalo, que segundo ele o havia atormentado e que considerava extremamente complexos. Em uma outra carta endereçada Bohr, em 21 de fevereiro de 1924, Pauli mencionou que esperava recomeçar seus estudos baseados em aspectos radicalmente diferentes do que os considerados até o momento em relação a estrutura atômica, “abandonando o conceito de órbitas definidas dos elétrons nos estados estacionários”⁵² (MEHRA, 2001. p. 572, tradução nossa).

Pauli considerava que o modelo de núcleo atômico não descrevia corretamente os fenômenos espectrais e suas estruturas múltiplas e o efeito Zeeman anômalo, no entanto ao tomar conhecimento dos trabalhos de Landé a respeito dos dupletos de raios X relativistas, ele o felicitou em um cartão postal em junho de 1924 e declarou sua satisfação “com o fato de as discrepâncias entre as observações e os princípios atualmente aceites da teoria quântica, que já apareceram no caso do efeito Zeeman anômalo, se tornarem agora ainda mais acentuadas”⁵³(Pauli a Landé, 30 de junho de 1924 apud MEHRA, 2001, p. 572-573, tradução nossa).

Pauli continuava cético em relação ao modelo do núcleo atômico e preferiu dar ênfase a outras ideias. Dessa maneira, considerou muito relevante os estudos relacionados as medidas das intensidades de multipletos realizada por Leonard Ornstein (1880-1941) e colaboradores, e as explicações propostas principalmente por Sommerfeld. Sommerfeld destacou a ocorrência de razões (ou coeficientes) inteiros na descrição dos dados obtidos, por esse motivo afirmou que a intensidade das linhas espectrais observadas podia ser determinada por funções dos números quânticos e pesos estatísticos. Pauli logo concordou com as opiniões de Sommerfeld ao destacar o papel dos números quânticos inteiros, além disso, assim como Sommerfeld, ele estava convencido a respeito da validade da teoria da relatividade e sua influência no estudo da estrutura atômica (MEHRA, 2001).

Pauli se voltou novamente aos estudos da estrutura atômica no verão de 1924,

⁵¹ Tradução livre. Texto original: 'In any case, it has been very good for me that I took leave of atomic theory for some time. Later, perhaps very soon, I will return to it with fresh forces'

⁵² Tradução livre. Texto original:

⁵³ Tradução livre. Texto original: 'very satisfied about the fact that the discrepancies between observations and the presently accepted principles of quantum theory, which have already showed up in the case of the anomalous Zeeman effect, now become still sharper' (Pauli to Lande, 30 June 1924).

fato que coincidiu com a elaboração de um artigo, escrito por ele, intitulado "Allgemeine Grundlagen der Quantentheorie des Atombaus" ("Fundamentos Gerais da Teoria Quântica da Estrutura Atômica"), que foi concluído em novembro de 1924, porém só foi publicado cinco anos mais tarde. Durante a elaboração desse artigo ele teve oportunidade de refletir a respeito de diversos problemas relacionados a estrutura atômica, e dessa forma se dedicou a eles após concluir seu artigo. Nesse período debateu com Landé, por meio de diversas cartas, a respeito de questões e consequências espectroscópicas e suas conclusões teóricas correspondentes (MEHRA, 2001).

Em 2 de dezembro de 1924, Pauli havia concluído um outro artigo, que foi recebido pela *Zeitschrift fur Physik*, e publicado em fevereiro de 1925. Nesse novo artigo, abordou o problema relacionado com a influência das correções relativísticas no efeito Zeeman. Em trabalhos anteriores Sommerfeld havia concluído que a influência relativística deveria ser muito pequena, considerando o átomo de hidrogênio e o hélio ionizado, que nesse caso apresentavam uma divisão Zeeman normal. No entanto, ao considerar os átomos alcalinos, sua estrutura de duplete e sua divisão Zeeman anômala, Pauli argumentou

Uma vez que, para números atômicos mais elevados, a velocidade dos K-elétrons já se aproximam sensivelmente da velocidade da luz e, portanto, a sua massa diverge consideravelmente da massa restante..., é de esperar que, para os elementos com números atômicos mais elevados, a influência da alteração relativista da massa na camada K sobre o efeito Zeeman dos espectros ópticos não possa de modo algum ser negligenciada ⁵⁴(Pauli, 1925a, p. 373-374 apud MEHRA, 2001, p. 574, tradução nossa).

Partindo da consideração acima, Pauli analisou a razão entre o valor absoluto do momento magnético (**M**) e o valor absoluto do momento angular orbital do elétron ligado ao núcleo (**J**), e como resultado obteve que todos os termos energéticos de divisão foram multiplicados pelo fator γ . Chegando à conclusão de que em decorrência das correções relativísticas a relação entre o valor absoluto do momento magnético e do valor absoluto do momento angular total da camada K, calculada classicamente, se desviava de seu valor esperado para o caso de elementos com

⁵⁴ Tradução livre. Texto original: 'Since, for higher atomic numbers, the velocity of the K-electron already approaches appreciably the velocity of light and their mass therefore deviates considerably from the rest mass..., one must consequently expect that for elements with higher atomic numbers the influence of the relativistic change of mass in the K-shell on the Zeeman effect of optical spectra cannot be neglected at all'.

números atômicos elevados, revelando valores menores (MEHRA, 2001).

Esse desvio observado na relação entre o momento magnético e o momento angular orbital do elétron ligado ao núcleo, também influenciou diretamente a equação da estrutura complexa, especialmente o conhecido fator g de Landé. Dessa forma Pauli concluiu:

Se nos agarrarmos às hipóteses de que mesmo os grupos de elétrons fechados, em particular a camada K, dão origem à anomalia magnética, temos de admitir não só uma duplicação da relação entre o momento magnético e o momento angular nestes grupos, em relação ao seu valor clássico, mas também uma compensação das correções da relatividade"⁵⁵(Pauli, 1925a, p. 383 apud MEHRA, 2001, p. 576, tradução nossa).

e salientou diversas dificuldades relacionadas a abordagem habitual (modelo de núcleo atômico) a saber: a camada K completa deveria possuir um momento angular não nulo e as outras camadas completas não; a razão giromagnética diferente do núcleo atômico e do elétron ligado⁵⁶ causava problemas para o caso de elétrons equivalentes (ou seja, elétrons com a mesma energia); e a análise realizada por Landé mostrava que o modelo de núcleo atômico não apresentava resultados quantitativamente equivalentes. Para contornar tais dificuldades Pauli propôs uma nova interpretação dos dados observados, que apresentou da seguinte forma:

As configurações de elétrons fechados não devem contribuir em nada para o momento magnético e o momento angular do átomo. Em particular, no caso dos elementos alcalinos, os valores do momento angular dos átomos e as suas deslocções de energia na presença de um campo magnético externo serão vistos essencialmente como sendo inteiramente devidos à ação do elétron de série, que também é considerado como origem da anomalia magneto-mecânica. A estrutura em duplete dos espectros alcalinos, bem como a violação do teorema de Larmor, é causada, segundo este ponto de vista, por um tipo peculiar, classicamente não descritível, de duplicidade das propriedades teóricas quânticas do elétron de série⁵⁷(Pauli, 1925a, p. 385 apud MEHRA, 2001, p. 576, tradução nossa).

⁵⁵ Tradução livre. Texto original: 'If one sticks to the assumptions that even closed electron groups, in particular the K-shell, give rise to the magnetic anomaly, then one must admit not only a doubling of the ratio of magnetic moment to angular momentum in these groups, as compared to its classical value, but also a compensation of the relativity corrections'.

⁵⁶ Citado na seção 6.1.4

⁵⁷ Tradução livre. Texto original: The closed electron configurations are supposed to contribute nothing to the magnetic moment and the angular momentum of the atom. In particular, in the case of alkali elements, the angular momentum values of the atoms and their energy shifts in the presence of an external magnetic field will be viewed essentially as being entirely due to the action of the series electron, which is also considered to be origin of the magneto-mechanical anomaly. The doublet structure of the alkali spectra, as well as the violation of Larmor's theorem, is caused, according to this view, by a peculiar, classically not describable kind of duplicity of the quantum-theoretical properties of the series electron.

Pauli destacou que sua interpretação também apresentava dificuldades, mas esperava que ela pudesse conduzir a uma melhor compreensão de fenômenos que até o momento permaneciam sem explicação, como a violação do teorema de Larmor. Em seguida apresentou a ideia de que o elétron de série era responsável pelas estruturas complexas e pelos efeitos Zeeman anômalos, e não o núcleo atômico como considerado pelo modelo de núcleo atômico (MEHRA, 2001).

Em uma carta enviada a Landé, datada de 4 de novembro de 1924, Pauli chamou atenção para a possibilidade de associar quatro números quânticos a qualquer elétron ligado e elaborar uma teorização para a estrutura atômica com essa base. Além disso, destacou que considerava o Princípio de Construção absolutamente válido. Indicou como um principal motivo que favorecia sua interpretação, que “nela as órbitas equivalentes encontram um lugar mais natural” (Pauli a Lande, 24 de novembro de 1924 apud MEHRA, 2001, p.577, tradução nossa). Ele ainda citou um artigo de Edmund C. Stoner (1899-1968), publicado na *Philosophical Magazine*, que poderia oferecer um suporte importante para sua interpretação (MEHRA, 2001).

Assim sendo, Pauli considerou o esquema proposto por Stoner uma confirmação de sua hipótese do papel do elétron de série na estrutura complexa (MEHRA, 2001). O esquema proposto por Stoner estabelecia que o número de elétrons possível (N) em uma camada fechada $n_{k j}$, coincidia com o número de subníveis em que o termo espectral $n_{k j}$, se dividia em um campo magnético. Nesse esquema n, k e j denotavam o número quântico principal, o número quântico azimutal e o número quântico interno respectivamente (MASSIMI, 2004). Em uma carta a Sommerfeld, Pauli comentou:

Anteriormente, quando eu tive este número da *Philosophical Magazine* em minhas mãos, eu tinha ignorado completamente este artigo [de Stoner]. Contudo, assim que li o seu prefácio [à quarta edição da *Atombau und Spektrallinien*], corri para a biblioteca e li o artigo de Stoner ⁵⁸ (Pauli para Sommerfeld, 6 de dezembro de 1924 apud MEHRA, 2001, p. 577, tradução nossa).

Pauli e Sommerfeld concordavam a respeito da importância do trabalho de Stoner, e por isso Sommerfeld pretendeu estender o modelo proposto por Stoner a átomos com camadas eletrônicas não fechadas. Ele acreditava que se as

⁵⁸ Tradução livre. Texto original: 'Earlier when I had this issue of *Philosophical Magazine* in my hands, I had completely skipped over this [Stoner's] paper. However, as soon as I read your preface [to the fourth edition of *Atombau und Spektrallinien*], I ran to the library and read Stoner's paper'

generalizações das ideias de Stoner oferecessem correspondência empírica, isso implicaria que o problema relacionado ao encerramento dos períodos estaria completamente correto “colocando mais esperança no poder mágico dos quanta do que em considerações de correspondência e estabilidade”⁵⁹ (SOMMERFELD, 1924d, p. 192 apud MEHRA, 2001, p. 577, tradução nossa).

De fato, assim como Sommerfeld, Pauli acreditava que o Princípio de Correspondência não tinha nenhuma relação com o problema do encerramento dos períodos. Em uma carta enviada a Bohr em 12 de dezembro de 1924, Pauli expressou essa opinião além de enviar um manuscrito de seu mais recente trabalho intitulado “Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren” (“A Relação Entre O Encerramento Dos Grupos De Elétrons Em Átomos E A Estrutura Complexa Dos Espectros”). Pauli enfatizou que as considerações presentes em seu manuscrito apresentavam uma interpretação alternativa extrema, em relação as considerações usuais (se referindo ao modelo do núcleo atômico) (MEHRA, 2001).

Após ser incentivado a publicar seu trabalho pelos físicos de Copenhague, e debater a respeito de algumas consequências de suas ideias com Alfred Landé e Ernst Back, Pauli submeteu seu trabalho a Zeitschrift für Physik, que foi recebido em 16 de janeiro e publicado em 21 de março de 1925. Nesse trabalho, organizou seus resultados em duas seções, a primeira “A Permanência Dos Números Quânticos (Princípio Da Construção) Em Estrutura Complexa E Efeito Zeeman” e a segunda “Uma Regra Geral Quântica-Teórica para a Possibilidade da Ocorrência de Elétrons Equivalentes num Átomo” (MEHRA, 2001).

Na primeira seção apresentou o tratamento de seus resultados baseados em suas considerações de trabalhos anteriores em que concluía que os elétrons de série possuíam uma duplicidade de propriedades teórico-quânticas. Considerando essa conclusão caracterizou os elétrons dos átomos alcalinos por meio de quatro números quânticos: o número quântico principal (n); o número quântico azimutal (k_1); um segundo número quântico azimutal (k_2), que estava relacionado ao número quântico do momento angular total (j), que no caso dos átomos alcalinos podia ser dado por $k_2 = j + \frac{1}{2}$; e o número quântico magnético m_1 , que poderia ser interpretado como a

⁵⁹ Tradução livre. Texto original: 'putting greater hope in the magic power of quanta than in correspondence and stability considerations'.

componente de \mathbf{j} , ou seja do momento angular total na direção de um campo magnético externo \mathbf{H} . Entretanto, para campos magnéticos fortes Pauli substituiu o número quântico k_2 , por um segundo número quântico magnético m_2 , que assumia dois valores $m_2 = m_1 + \frac{1}{2}$ e $m_2 = m_1 - \frac{1}{2}$. Pauli relacionou a presença de valores semi-inteiros dos números quânticos com os valores anômalos do fator giromagnético (ou fator g) e a correção relativística, que havia sido descrita por uma equação relativista envolvendo o dobro do número quântico usualmente associado ao núcleo (MEHRA, 2001).

A partir da caracterização dos termos espectrais por meio de quatro números quânticos, Pauli iniciou o desenvolvimento de um modelo para o sistema periódico dos elementos. Segundo ele a principal vantagem de sua abordagem era o fato de satisfazer e ser coerente com o Princípio de Construção (MEHRA, 2001; MASSIMI, 2004). Assim, foi capaz de obter a energia de perturbação magnética de átomos de muitos elétrons como a soma da energia magnética do núcleo atômico (que poderia ser obtida a partir do elemento anterior no sistema periódico dos elementos) e a energia magnética dos elétrons de série, enfatizando dessa forma que apenas as contribuições dos elétrons de valência tinham que ser consideradas (MEHRA, 2001).

Ao final da primeira seção, Pauli mencionou duas dificuldades enfrentadas por suas considerações relacionadas ao sistema periódico. Em primeiro lugar não fornecia uma explicação para a existência de diferentes estruturas de termos para átomos de muitos elétrons, como por exemplo a existência de estados de singleto e tripleto nos átomos alcalinos terrosos. Em segundo lugar, não estabelecia uma ligação óbvia com o Princípio de Correspondência de Bohr e por isso não era possível derivar as regras de seleção dos espectros atômicos. Nas palavras de Pauli:

Agora surge o difícil problema de como a ocorrência do tipo de movimento, que é exigido pelo princípio de correspondência para o elétron de série, pode ser interpretado fisicamente, independentemente da sua interpretação até agora assumida, especificamente dinâmica, que dificilmente pode ser mantida" (Pauli, 1925b, p. 771 apud MEHRA, 2001, p. 579, tradução nossa).

afirmou que a solução para esse problema poderia ser a base para a solução dos cálculos dos termos energéticos dos átomos (MEHRA, 2001).

Na segunda seção de seu trabalho Pauli se dedicou a questão dos elétrons equivalentes nos átomos, ou seja, os elétrons que possuem o mesmo número quântico principal (n). Destacou o fato de que a estrutura de termos observados de um determinado elétron permitir determinar se o átomo tinha elétrons equivalentes ou

não. Um exemplo disso estava presente nos átomos alcalinos terrosos, que em seu estado fundamental apresentava estrutura de singleto com dois elétrons equivalentes, enquanto, no estado de tripleto inferior, os dois elétrons possuíam números quânticos principais diferentes. A partir dessas observações, Pauli concluiu que as regras teóricas que descrevem os elétrons equivalentes em átomos deveriam ser formuladas de tal maneira que certos termos energéticos dos átomos não ocorram de maneira alguma, caso contrário certos termos de multipletos serão coincidentes com outros (MEHRA, 2001).

Pauli relacionou as observações empíricas com a distribuição dos elétrons nos átomos, seguindo o esquema de Stoner, e generalizou as regras presentes nesse esquema nos seguintes termos:

Nunca podem existir dois ou mais elétrons equivalentes no átomo para os quais, em fortes campos [magnéticos externos], os valores de todos os números quânticos n, k_1, k_2, m_1 (ou, o que equivale ao mesmo, n, k_1, m_1, m_2) coincidem. Se o átomo contém um elétron para o qual estes números quânticos assumem valores definitivos (num campo externo), então este estado está "ocupado" (PAULI, 1925b, p.776 apud MEHRA, 2001, p.580, tradução nossa).

Com esse pressuposto, foi possível derivar a duração dos períodos do sistema periódico dos elementos, isto é, os valores 2, 8, 18 e 32 eram resultado da soma de todos os elétrons permitidos nas camadas caracterizadas pelos números quânticos principais $n = 1, 2, 3, 4$ etc. Determinou que o número de subníveis nos quais os termos n, k_1, m_1, m_2 se divide em decorrência de um forte campo magnético foi de $2(2k - 1)$, ou o equivalente a $2n^2$ (MASSIMI, 2004; MEHRA, 2001). Ainda com sua hipótese, Pauli explicou a inexistência do estado de tripleto nos átomos alcalinos terrosos considerando que para $k_1 = m_1 = 1$, os dois elétrons na camada exterior deveriam ter valores diferentes do número quântico m_2 , ou seja $m_2 = +\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$, estes acrescentam a $m_2 = 0$, ou $j = 0$, para todo o átomo, portanto o estado mais baixo deve ser um estado de singleto, enquanto que o estado s tripleto era proibido (MEHRA, 2001).

A regra proposta por Pauli para os elétrons equivalentes, ficou posteriormente conhecida como "Princípio de Pauli", ou "Princípio de Exclusão de Pauli", e foi quase que imediatamente aceita pelos físicos que trabalhavam com espectroscopia e no desenvolvimento da Teoria Atômica. As evidências empíricas em favor de sua hipótese confirmavam seu trabalho. Werner Heisenberg, aplicou o Princípio de

Exclusão imediatamente em seu próximo trabalho relativo as estruturas múltiplas e os efeitos Zeeman, e demonstrou nesse trabalho que esse princípio era compatível com uma formulação ampliada do Princípio da Correspondência. Ao final de 1925, o Princípio de Exclusão já integrava as leis reconhecidas e aceitas pela Física Atômica.

6.1.6 O Spin Do Elétron

O desenvolvimento dos modelos propostos no processo de desenvolvimento dos estudos atômicos, se baseavam em relações envolvendo números inteiros. No entanto, em determinadas ocasiões envolvendo determinados fenômenos, essas condições quânticas não descreviam adequadamente a dinâmica dos átomos, sobretudo pelo fato dos elétrons se moverem em órbitas sob força atrativa do núcleo e repulsão dos elétrons vizinhos. Desse modo era difícil esperar que a situação dinâmica dos átomos pudesse ser descrita por meio de relações entre números inteiros (MEHRA, 2001).

No início da década de 1920, Niels Bohr afirmava que para uma compreensão detalhada a respeito da estrutura atômica e seus espectros, era preciso levar em consideração a interação entre as partículas constituintes do átomo. Porém as contribuições para a compreensão da estrutura atômica desenvolvidas por Stoner e Pauli, não se relacionavam com qualquer interação ou acoplamento nos átomos. Os físicos de Copenhague, apesar de reconhecerem o progresso trazido pelas contribuições de Stoner e Pauli, consideravam os modelos usuais mais bem sucedidos do que Pauli considerava. Pauli afirmava que a sua abordagem nada tinha nada a ver com a anterior imagem dinâmica atribuída aos átomos, que considerava estar fundamentalmente errado (MEHRA, 2001).

Pauli ponderou essa discordância de ideias, declarando em um documento em 1924, após discutir a respeito das consequências de suas novas ideias e das antigas na descrição do efeito Zeeman anômalo: "Talvez a solução final dos problemas aqui considerados se situe na direção de um compromisso entre estes dois pontos de vista" (Pauli, 1925a, p. 385 apud MEHRA, 2001, p. 585-586, tradução nossa). Essa declaração encorajou muitos físicos teóricos a trabalharem no intuito de conciliar o Princípio de Exclusão de Pauli com as abordagens dinâmicas ao tratar problemas da estrutura atômica, visto que até essa época os físicos que trabalhavam com a estrutura múltipla e com os efeitos Zeeman anômalo utilizavam várias versões do

modelo do núcleo atômico (MEHRA, 2001).

Um problema que teve atenção especial de físicos da década de 1920, foi devido a tipos de estruturas múltiplas (ou multipletos) que não podiam ser descritos por meio da equação empírica proposta por Landé em 1923. Portanto, Landé e Ernst Back investigaram minuciosamente a estrutura de multipletos do átomo de neon, e diversos meses depois Back considerou um outro exemplo de multipletos oriundos da análise dos espectros dos átomos de Cálcio (Ca). Ao abordar os efeitos Zeeman desses multipletos, Back concluiu que "os grupos de linha de Ca investigados pelo autor pertencem ao sistema de "novos termos", que foi identificado e interpretado mais recentemente por Russell e Saunders nos espectros dos alcalinos terrosos" (Back, 1925b. p. 580 apud MEHRA, 2001, p. 587, tradução nossa).

No trabalho que Back fez referência, publicado em 1925, Russell e Saunders se dedicaram a análise e interpretação de diversas linhas proeminentes nos espectros de cálcio e de átomos alcalinos, que não pertenciam às séries regulares, mas que segundo eles deveriam estar intimamente relacionadas. Os autores entendiam essas linhas proeminente como

vários grupos de linhas muito visíveis, exatamente do carácter agora reconhecido como multipletos, que são evidentemente combinações entre termos triplos conhecidos e outros termos para os quais não é possível encontrar lugar na série reconhecida" (RUSSELL; SAUNDERS, 1925, p. 42 apud MEHRA, 2001, p. 588, tradução nossa).

As primeiras menções a respeito das referidas linhas datavam de 1894, mas por volta da década de 1920 o interesse por elas se intensificou porque essas linhas não pareciam ser descritas pelas equações empíricas e pelo modelo de estrutura atômica até então conhecidos (MEHRA, 2001).

Os progressos conquistados a respeito da compreensão das linhas anômalas incentivaram investigações de vários físicos nesse âmbito. Como por exemplo Ralph de Laer Kronig (1904-1995), que ampliou suas considerações a respeito das linhas anômalas e suas componentes Zeeman, Gregor Wentzel que completou a organização dos termos dos átomos alcalinos e Friedrich Hund (1896-1997) que realizou uma análise minuciosa dos espectros de todos os elementos e desenvolveu uma interpretação parcialmente completa dos espectros complexos, baseando sua interpretação no Princípio de Exclusão de Pauli em detrimento ao modelo do núcleo atômico, evitando porém qualquer discussão teórica desses modelos. Questões de

âmbito teórico foram abordadas posteriormente devido principalmente a preocupação em atribuir um significado físico ao quarto número quântico associado ao elétron, como proposto por Pauli. A primeira tentativa de interpretação física do quarto número quântico foi proposta por Ralph de Laer Kronig (MEHRA, 2001).

Kronig tomou conhecimento do esquema de quatro números quânticos para o elétron ligado proposto por Pauli, durante sua estadia em Tübingen ocorrida no início de 1925. Ele se interessava pela estrutura atômica desde quando estudava na Universidade de Columbia (entre os anos de 1919 e 1924) devido a esse interesse, havia estudado as teorizações a respeito do efeito Zeeman anômalo e sua espectroscopia. Ao chegar em Tübingen, Landé noticiou a Kronig que no dia seguinte Pauli estaria ali. Além disso, Landé mostrou a ele uma carta que Pauli havia lhe enviado (em 24 de novembro de 1924), que apresentava suas novas ideias a respeito da estrutura atômica (MEHRA, 2001).

A leitura da carta de Pauli instigou a curiosidade de Kronig a respeito dos quatro números quânticos atribuídos ao elétron ligado, em particular aos dois momentos angulares apresentados. Como evidentemente nenhum momento angular, descrito pelo esquema de Pauli podia ser atribuído ao núcleo, ele considerou que poderia ser então interpretado como um momento angular intrínseco do elétron (MEHRA, 2001).

Kronig não interpretou o momento angular do elétron assumindo sua rotação intrínseca sobre seu próprio eixo, como Arthur Compton havia assumido em seu trabalho apresentado em 1920. Seu principal interesse era obter uma interpretação para o quarto número quântico associado ao elétron, e conforme recordou mais tarde “na linguagem dos modelos anteriores ao desenvolvimento da mecânica quântica, que era a única base de discussão que se tinha, isto só podia ser representado como devido à rotação do elétron sobre seu eixo” (KRONIG, 1960, p. 20 apud MEHRA, 2001, p. 592- 593, tradução nossa).

Ele reconhecia que essa interpretação apresentava várias dificuldades, mas considerou uma ideia promissora e na mesma tarde que leu a carta de Pauli a Landé, derivou suas consequências. Para Kronig era óbvio que um elétron que possui um momento angular intrínseco (em unidades de $\frac{h}{2\pi}$) e se movia ao redor de um núcleo, podia assumir dois estados, um paralelo e outro antiparalelo em relação ao campo interno. Para determinar o campo magnético interno utilizou um sistema de coordenadas que o elétron permanecia em repouso e o campo era proveniente do

movimento do núcleo. A partir dessas considerações, foi capaz de determinar que a diferença entre os estados de dupletos obedeciam a lei Z^4 da hipótese do acoplamento magnético, como eram previstas pela Teoria da Relatividade, dessa maneira obteve uma equação relativista sem considerar qualquer aspecto relativista (MEHRA, 2001).

No dia seguinte Pauli veio, e assim que teve oportunidade Kronig o abordou e apresentou sua ideia, e para seu desapontamento Pauli expressou uma opinião negativa e disse: "Essa é certamente uma ideia muito inteligente, mas a natureza não é assim" ('Das ist ja ein ganz witziges Aperçu, aber so ist die Natur schon meat,' reported by Kronig, AHQP Interview, 11 December 1962, p. 16. Apud MEHRA 2001, p. 593, tradução nossa).

Kronig estava ciente que sua proposta apresentava certas dificuldades, uma delas foi constatado devido ao estudo mais aprofundado da equação para a separação de dupletos, que previa o dobro do valor obtido empiricamente. Uma outra dificuldade era que os fatores giromagnéticos (ou fatores g) anômalos não poderiam ser explicados por meio de sua hipótese. Mesmo considerando as limitações de sua hipótese Kronig se surpreendeu com a reação veementemente negativa de Pauli, e posteriormente ao não receber uma reação positiva em Copenhague, por físicos como Hendrik Kramers e Werner Heisenberg, desistiu de pensar a respeito do assunto e não publicou nada a esse respeito (MEHRA, 2001).

Apesar de Kronig não ter publicado nada a respeito de sua hipótese, a ideia que relacionava a interpretação do quarto número quântico, introduzido por Pauli, ao movimento de rotação intrínseco do elétron, ressurgiu em Leyden, por volta de meio ano mais tarde por George E. Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Goudsmit (1902-1978). Nesse período Uhlenbeck e Goudsmit eram membros do Instituto de Física Teórica de Paul Ehrenfest em Leyden, local que poderia ser considerado propício para o desenvolvimento de ideias consideradas não convencionais (MEHRA, 2001).

Ehrenfest demonstrava interesse pela compreensão da estrutura atômica, pelo menos desde 1916 devido as propostas de interpretações dadas por Bohr. Além disso, em seu Instituto em Leyden, os físicos foram devidamente informados tanto por Bohr quanto por seu assistente Kramers a respeito dos detalhes das aplicações de seus princípios na descrição dos dados espectroscópicos. Apesar de sua próxima relação com Copenhague, Ehrenfest mantinha uma certa independência em relação a tendência dominante de ideias relacionadas a estrutura atômica, dessa forma não

seguia fielmente todas suas propostas, em parte porque a espectroscopia não constituía seu campo de interesse principal e porque tinha conhecimento, por meio de discussões com seu amigo Albert Einstein, que os modelos propostos apresentavam diversas dificuldades (MEHRA, 2001).

Durante a década de 1920, Ehrenfest tomou a postura de observador em relação ao desenvolvimento de teorias a respeito da estrutura atômica, porém apesar de seu aparente afastamento ele incentivou seu aluno Samuel Abraham Goudsmit a realizar uma análise teórica de dados espectroscópicos. Goudsmit havia ingressado no instituto Ehrenfest em 1919 e de imediato se interessou pela espectroscopia. Ehrenfest reconhecendo o potencial de seu aluno encaminhou Goudsmit a Amsterdã para trabalhar como assistente de Pieter Zeeman durante três dias da semana. Goudsmit concentrou-se essencialmente à espectroscopia e em poucos anos havia se tornado um espectroscopista experiente (MEHRA, 2001).

Ao final de 1924 Goudsmit se concentrou em discussões relacionadas a intensidade das linhas espectrais, e em colaboração com Ralph Kronig buscou elaborar equações que se adequassem as regularidades empíricas identificadas por Leonard Ornstein e colaboradores. Trabalhou também em colaboração com Dirk Coster concentrando-se no estudo das intensidades das linhas espectrais de raios X. Durante a segunda metade de 1925 trabalhou com George Eugene Uhlenbeck, com quem publicou alguns artigos contendo importantes considerações relacionadas a estrutura atômica e a interpretação do quarto número quântico presente no esquema de Pauli (MEHRA, 2001).

Uhlenbeck era aproximadamente um ano e meio mais velho que Goudsmit, porém sua carreira acadêmica era considerada um pouco aquém se comparada com a de Goudsmit. No período que ingressou a Leyden, em 1918, Uhlenbeck não teve contato próximo com Ehrenfest pois este não ministrava cursos introdutórios, todavia em 1922, Ehrenfest foi fundamental para que Uhlenbeck recebesse o cargo de tutor para o filho do embaixador holandês em Roma. Ao regressar a Leyden em 1925, assumindo a função de assistente de Ehrenfest, ele havia se tornado em autodidata e aprendido as teorias da Física por meio da leitura de livros (MEHRA, 2001).

Como assistente de Ehrenfest, Uhlenbeck frequentemente lia novos artigos e relatava seu conteúdo a Ehrenfest, e rapidamente se adaptou a esse método. Dessa forma, Ehrenfest julgou pertinente que seu novo assistente conhecesse e se familiarizasse com os recentes avanços da Física, em especial dos avanços

relacionados a compreensão da estrutura atômica. Para isso Ehrenfest, pediu a Goudsmit que apresentasse o conteúdo de novos artigos contendo os avanços concernentes a estrutura atômica a Uhlenbeck. Para isso Goudsmit, teve a necessidade de apresentar todo o novo material de forma cuidadosa e laboriosa, e a partir das perguntas formuladas por Uhlenbeck, ele percebeu que existiam mais dificuldades nas teorizações a respeito da estrutura atômica do que ele havia pensado anteriormente e havia sido negligente ao desconsiderar tais dificuldades ao descrever os dados espectroscópicos por meio de números quânticos (MEHRA, 2001).

Logo o trabalho colaborativo entre Goudsmit e Uhlenbeck, apresentou resultados muito produtivos, tanto que anos mais tarde Goudsmit declarou que “a ocupação fresca e sem preconceitos de Uhlenbeck com problemas atômicos e as suas muitas observações céticas e perguntas inteligentes nos levaram a uma série de resultados importantes”⁶⁰ (GOUDSMIT, 1965, p. 450 apud MEHRA, 2001, p.599, tradução nossa).

Os resultados iniciais oriundo do trabalho colaborativo de Goudsmit e Uhlenbeck foram publicados em um artigo a respeito do espectro do hidrogênio, na edição de agosto-setembro de 1925 da revista *Physica*. Eles continuaram a trabalhar juntos em discussões e análises de problemas relacionados a estrutura atômica, se concentrando mais profundamente nos quatro números quânticos que Pauli havia introduzido recentemente (MEHRA, 2001). Em uma de suas discussões, como lembrou Goudsmit e Uhlenbeck mais tarde em uma entrevista, enquanto Goudsmit estava tentando explicar a Uhlenbeck o princípio de Pauli e a respeito dos quatro números quânticos, Uhlenbeck fez a seguinte afirmação:

Se há quatro números quânticos, deve haver quatro graus de liberdade... E se há quatro graus de liberdade, então deve haver algum tipo de movimento interno (Uhlenbeck in Goudsmit, AHQP Interview, 7 December 1963, pp. 4-5, apud MEHRA, 2001, p. 600, tradução nossa)⁶¹.

Seguindo esse raciocínio, Uhlenbeck propôs associar o quarto número quântico do elétron ligado proposto por Pauli, a um grau de liberdade dinâmico do elétron. Goudsmit já havia estudado a respeito do esquema de Pauli, mas nunca tentou dar uma interpretação ao quarto número quântico associado ao elétron ligado. Por outro

⁶⁰ Tradução livre. Texto original: “Uhlenbeck’s fresh and unprejudiced occupation with atomic problems and his many skeptical remarks and intelligent questions led us to a number of important results’.

⁶¹ Tradução livre. Texto original: ‘If there are four quantum numbers, there must be four degrees of freedom...And if there are four degrees of freedom, then there must be some kind of internal motion’.

lado, para Uhlenbeck, que conhecia muito bem a mecânica estatística clássica a situação proposta parecia muito evidente, e alegou:

Uma vez que (como eu tinha aprendido) cada número quântico correspondia a um grau de liberdade do elétron, o quarto número quântico deve significar que o elétron tinha um grau de liberdade adicional - em outras palavras, o elétron deve ser "rotativo" (UHLENBECK, 1976, p. 46 apud MEHRA, 2001, p. 601, tradução nossa)⁶².

Goudsmit, achou a proposta de Uhlenbeck bastante interessante porque ao atribuir um momento angular intrínseco ao elétron com magnitude de $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$, segundo ele os esquemas teóricos se encaixariam aos resultados empíricos relacionados a todas as divisões Zeeman (MEHRA, 2001). Como Goudsmit recordou vários anos depois:

Após sua declaração a respeito do spin [ou seja, a rotação intrínseca do elétron] reconhecemos imediatamente que era agora completamente claro porque m_s [ou seja, o número quântico que substituí m_l no esquema de Pauli] era sempre $\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$. Além disso vimos que todas as divisões Zeeman podiam ser explicadas ao atribuir ao elétron um momento magnético de um magnéton de Bohr [ou seja, $\frac{e h}{4\pi m_e c}$]. Também se tornou claro que o spin concordava perfeitamente com nossa nova interpretação do hidrogênio [espectro] (Goudsmit, 1965, p. 450, apud MEHRA, 2001, p. 601, tradução nossa)⁶³.

Embora a consideração acima parecesse óbvia, Goudsmit e Uhlenbeck ficaram um pouco apreensivos a seu respeito e por isso procuraram investigar mais profundamente as consequências teóricas em atribuir um momento angular intrínseco ao elétron. Por esse motivo Goudsmit, perguntou a Uhlenbeck por meio de uma carta enviada a Amsterdã, onde Uhlenbeck ainda trabalhava no instituto Zeeman, se a razão giromagnética de uma partícula carregada dependia de sua extensão linear. Considerando sua hipótese ainda muito especulativa, eles não planejavam publicar nada a esse respeito. No entanto, Ehrenfest que havia tomado conhecimento de suas ideias, interferiu encorajando seus assistentes, além disso, assim que Uhlenbeck lhe

62

Tradução livre. Texto original: 'Since (as I had learned) each quantum number corresponded to a degree of freedom of the electron, the fourth quantum number must mean that the electron had an additional degree of freedom — in other words, the electron must be rotating'.

⁶³ Tradução livre. Texto original: After his remark about the spin [i.e., the intrinsic rotation of the electron], we recognized immediately that it was now completely clear why m_s [i.e., the quantum number replacing Pauli's m_l in Goudsmit's scheme] was always $\frac{1}{2}$ or $-\frac{1}{2}$. Further we saw that all Zeeman splittings could be explained if one assigned to the electrons a magnetic moment of an entire Bohr magneton [i.e., of $e h / 4\pi m_e c$]. Besides it became clear that the spin agreed completely with our new interpretation of the hydrogen [spectrum].

mostrou a carta recebida por Goudsmit ele o lembrou de um antigo trabalho de 1902 de Max Abraham (1875-1922) a respeito das propriedades magnéticas do elétron estendido. Ao estudar o trabalho de Abraham detalhadamente e aplicar as hipóteses nele presente ao seu problema, Uhlenbeck conseguiu identificar que se o elétron possuísse uma carga superficial, a razão giromagnética (ou fator g) resultaria em $\frac{e}{m_e c}$ o que corresponde a um fator g igual a 2, que correspondia perfeitamente aos dados espectroscópicos (MEHRA, 2001).

Ao ser informado dos resultados obtidos, Ehrenfest pediu a Goudsmit e Uhlenbeck que escrevessem uma pequena nota a *Naturwissenschaften* e lhe entregasse. Ao receber a nota Ehrenfest acrescentou que devido aos cálculos do fator g estarem baseados em um modelo de elétrons não-relativista perguntaria a opinião de Hendrik Lorentz (1853-1928) (MEHRA, 2001).

Assim como requerido por Ehrenfest, Goudsmit e Uhlenbeck redigiram a nota para *Naturwissenschaften*. Nela eles primeiro descreveram o modelo do núcleo atômico ou como ficou conhecido posteriormente modelo vetorial de Landé, apresentando todas suas complicações e fragilidades teóricas. Em seguida apresentaram uma hipótese para a eliminação dessas dificuldades, baseada no esquema de Pauli, reinterpretando ligeiramente os quatro números quânticos propostos anteriormente. Salientaram que o esquema de Pauli não explicava os dupletos de raios X relativistas e nem os espectros dos átomos alcalinos, a não ser que fosse assumido uma hipotética “duplicidade não mecânica”, e a reinterpretação apresentada poderia evitar tal problema (MEHRA, 2001).

Em sua reinterpretação Goudsmit e Uhlenbeck mantiveram as interpretações anteriores do modelo vetorial de Landé para n, k e J como número quântico principal, número quântico azimutal, número quântico interno respectivamente, mas sugeriram relacionar R (equivalente a m_1 no esquema de Pauli) a uma rotação intrínseca do elétron, interpretação que, segundo eles, seria perfeitamente coerente com os dados empíricos, desde que se pudesse demonstrar que o fator giromagnético do elétron era de fato 2 e que se pudesse demonstrar a equação correta para os dupletos relativistas (MEHRA, 2001).

Assim como prometera a Goudsmit e Uhlenbeck, Ehrenfest escreveu a Lorentz informando-o a respeito do problema de seus alunos. Nessa época Lorentz já estava aposentado, mas ainda ministrava palestras todas as segundas-feiras pela manhã em

Leyden. Na segunda-feira que se seguiu após a conversa com Ehrenfest, Uhlenbeck abordou Lorentz pessoalmente a respeito do assunto. Como Uhlenbeck lembrou mais tarde, Lorentz foi muito gentil e disse que pensaria no assunto e que daria sua opinião na semana seguinte. Assim como disse, na semana seguinte Lorentz trouxe a ele uma pilha de papéis contendo diversos cálculos, fato que o fez compreender que havia sérios problemas em suas considerações (MEHRA, 2001).

Imediatamente após a conversa com Lorentz, Goudsmit e Uhlenbeck, disseram a Ehrenfest que a hipótese apresentada na nota para *Naturwissenschaften* era absurda que achavam melhor não publicar. No entanto Ehrenfest respondeu que já tinha enviado a nota a tempos e que ela apareceria na imprensa rapidamente, e tranquilizou seus alunos dizendo: “São ambos jovens o suficiente para poderem pagar por uma estupidez como essa” (*Sie sind beide jung genug um sich eine Dummheit leisten zu können,* Ehrenfest, quoted by Uhlenbeck, 1976, p. 47 apud MEHRA, 2001, p. 603, tradução nossa).

De fato, a nota redigida por Goudsmit e Uhlenbeck foi publicada algumas semanas depois, e imediatamente após sua publicação gerou diversas reações. Por exemplo, exatamente no dia seguinte à publicação Heisenberg escreveu a Goudsmit expressando sua concordância com a hipótese do elétron rotativo, mas perguntou como eles haviam eliminado o fator 2 nas equações dos dupletos. Segundo Mehra (2001), eles em sequer tinham percebido essa dificuldade porque ainda não tinha realizado os cálculos relacionados a equação dos dupletos. Devido a indagação de Heisenberg, Uhlenbeck efetuou os cálculos e identificou que realmente havia uma dificuldade a respeito do fator 2 na equação dos dupletos (MEHRA, 2001).

Os resultados desfavoráveis identificados por eles, logo foram abrandados pela reação que a hipótese do elétron rotativo recebeu de Einstein e Bohr (que participaram da celebração do cinquentenário de doutoramento de Hendrik Lorentz em Leyden em dezembro de 1925). Antes de ir a Leyden, Bohr tinha feito uma visita a Hamburgo para conhecer Pauli e durante sua visita Pauli o alertou contra a aceitação do elétron rotativo. Entretanto ao chegar a Leyden Bohr foi totalmente convencido por essa ideia, como escreveu meses mais tarde a Kronig:

Quando vim a Leyden aos festivais de Lorentz, Einstein perguntou-me logo no primeiro momento em que o vi o que eu pensava sobre o elétron giratório. Quando perguntei sobre a causa da necessidade do acoplamento mútuo entre o eixo de rotação e o movimento orbital, Einstein explicou que este acoplamento era uma consequência imediata da teoria da relatividade. Esta observação funcionou como uma revelação completa para mim, e desde

então nunca mais hesitei na minha convicção de que estávamos finalmente no fim das nossas tristezas (Bohr a Kronig, 26 de março 1926, apud MEHRA, 2001, p.603, tradução nossa).⁶⁴

Pauli, que havia introduzido um quarto número quântico associado ao elétron ligado, não concordava com a interpretação como um grau de liberdade rotacional. Ao aplicar a mecânica quântica utilizando modelos atômico considerando o spin, Pauli em colaboração com Heisenberg evidenciaram que esse modelo provocava uma catástrofe no caso da estrutura fina do hidrogênio (MEHRA, 2001). Mesmo com a resistência oferecida por Pauli em relação a hipótese do movimento de rotação e o momento angular intrínseco do elétron, Goudsmit e Uhlenbeck continuaram seu trabalho e progrediram rapidamente ao utilizar suas ideias na descrição dos espectros complexos. Apresentaram seus resultados na revista *Zeitschrift fur Physik*, na edição de novembro de 1925, em que elaboraram um modelo atômico vetorial no qual atribuíram a cada elétron ligado além do vetor momento angular (K), outro vetor (R) com magnitude $\frac{1}{2} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$. É importante mencionar que Goudsmit e Uhlenbeck não mencionaram explicitamente o elétron rotativo quantizado, mas argumentaram que o vetor R poderia ser interpretado como um momento angular intrínseco do elétron (MEHRA, 2001).

Esse esquema vetorial proposto por Goudsmit e Uhlenbeck, permitiu a análise de todos os acoplamentos possíveis entre os “vetores quânticos” desde que os átomos pudessem ser descritos como constituídos por um íon com vetores de momento angular orbital (K_1) e momento angular intrínseco (R_1) e um elétron com k_2 e R_2 . Assim os dois vetores associados ao íon e os vetores associados ao elétron de série, somariam duas resultantes $J_1 = K_1 + R_1$ e $J_2 = K_2 + R_2$ e o acoplamento de J_1 e J_2 produziria os termos de energia, ou seja, os termos energéticos se davam devido ao acoplamento entre o momento angular orbital k e o momento angular intrínseco R . Dessa forma, eles calcularam os fatores g e chegaram a uma equação com a mesma estrutura que a equação elaborada por Landé em 1923. Portanto o acoplamento ($K - R$) resultou em uma descrição coerente dos fatores g anômalos, analisados

⁶⁴ Tradução livre. Texto original: ‘When I came to Leyden to the Lorentz festivals, Einstein asked the very first moment I saw him what I believed about the spinning electron. Upon my question about the cause of the necessity of the mutual coupling between spin axis and the orbital motion, he explained that this coupling was an immediate consequence of the theory of relativity. This remark acted as a complete revelation to me, and I have never since faltered in my conviction that we at last were at the end of our sorrows’.

anteriormente por Russell e Saunders e da estrutura fina do espectro de hidrogênio. Como Goudsmit e Uhlenbeck argumentaram

Em particular, a nova teoria explica de imediato a ocorrência de certos componentes em a fina estrutura do espectro do hidrogênio e o espectro da faísca do hélio que, de acordo com antigo esquema corresponderia a transições em que K permaneceria inalterado. A menos que estas transições pudessem ser atribuídas à ação de forças elétricas na descarga o que perturbaria o movimento eletrônico, a sua ocorrência estaria em desacordo com o princípio da correspondência, que só permite transições em que o número quântico azimutal muda por uma unidade. No novo esquema, vemos que, nas transições em questão, K irá de fato mudar por uma unidade e apenas J permanecerá inalterado. A sua ocorrência está, portanto, em total conformidade com o princípio da correspondência (Uhlenbeck e Goudsmit, 1926, p. 264, apud MEHRA, 2001, p. 607, tradução nossa)⁶⁵.

Ao apresentar o novo esquema por meio de uma carta a *Nature*, Goudsmit e Uhlenbeck destacaram que o novo esquema explicava completamente os dupletos de raios X que segundo eles podia ser entendido como duplas de estados com o mesmo momento angular (J) e números quânticos (K) diferentes e, portanto, esses estados correspondiam a órbitas de elétrons que penetravam a distancias diferentes do núcleo. Por outro lado, os chamados dupletos relativistas eram caracterizados pelo menos número quântico (K) mas com orientação do eixo de rotação em relação ao plano orbital oposto e dessa forma poderiam se denominados como “dupletos de spin” (MEHRA, 2001).

A partir desse novo esquema, também foi possível estabelecer uma analogia entre os dupletos óticos e os dupletos de raio X, visto que os dupletos óticos podiam ser interpretados como “dupletos de spin” assim como os dupletos de raios X relativistas. Por fim, Goudsmit e Uhlenbeck abordaram quantitativamente o efeito Zeeman e afirmaram que a introdução do elétron magnético era responsável pela violação do Teorema de Larmor. Apesar dessas contribuições, eles tiveram problemas ao explicar o fator 2 presente na equação dos dupletos e na descrição da estrutura fina das linhas de hidrogênio (MEHRA, 2001).

A resposta para essas dificuldades surgiu por meio de uma carta a *Nature*,

⁶⁵ Tradução livre. Texto original: ‘In particular the new theory explains at once the occurrence of certain components in the fine structure of the hydrogen spectrum and the helium spark spectrum which according to the old scheme would correspond to transitions where K remains unchanged. Unless these transitions could be ascribed to the action of electric forces in the discharge which would perturb the electronic motion, their occurrence would be in disagreement with the correspondence principle, which only allows transitions in which the azimuthal quantum number changes by one unit. In the new scheme we see that, in the transitions in question, K will actually change by one unit and only J will remain unchanged. Their occurrence is, therefore, quite in conformity with the correspondence principle’.

datada de 20 de fevereiro de 1926 redigida por Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992). Ele havia participado das discussões de Bohr e Kramers a respeito da dificuldade do fator 2 na hipótese do elétron rotativo entre o final de 1925 e início de 1926, e ao se familiarizar com as dificuldades encontradas sugeriu abordar a questão de forma relativística. Kramers desacreditou de sua sugestão e respondeu: “isso só fará uma pequena correção” (Thomas, AHQP Interview, 10 de maio de 1962 apud MEHRA, 2001, p. 608, tradução nossa). Apesar da resposta de Kramers, Thomas aplicou a teoria da relatividade geral ao problema em questão e expôs os resultados de seus cálculos com detalhes em um artigo publicado na *Philosophical Magazine* deixando claro seu percurso para a descrição da estrutura fina das linhas de hidrogênio e dos efeitos Zeeman anômalos (MEHRA, 2001).

Devido as correções realizadas por Thomas, Bohr convenceu-se imediatamente da hipótese do spin do elétron. Pauli hesitou durante algum tempo, duvidando dos resultados provenientes dos cálculos realizados por Thomas, mas posteriormente utilizou a hipótese do spin do elétron tentando incorporá-la em descrições mecânico quânticas. Mais tarde, considerando o formalismo quântico Bohr conseguiria demonstrar, para a grande satisfação de Pauli "que o spin do elétron não pode ser medido por experiências classicamente descritíveis (como, por exemplo, a deflexão de feixes moleculares [de elétrons] em campos eletromagnéticos externos) e deve, portanto, ser considerado uma propriedade essencialmente mecânico quântica do elétron"⁶⁶ (Pauli, 1948, p. 134 apud MEHRA, 2001, p. 609-610, tradução nossa). O conceito de spin do elétron havia de fato posto fim a parte das dificuldades da teoria atômica, mais tarde outras aplicações foram propostas estabelecendo o conceito de spin como uma propriedade intrínseca do elétron (MEHRA, 2001).

6.1.7 Formulações Da Mecânica Quântica

Nas seções anteriores foram apresentados os desenvolvimentos de modelos atômicos e tentativas de fornecer interpretação teórica e causal a fenômenos físicos conhecidos (como por exemplo o efeito Zeeman anômalo e o efeito Stark)⁶⁷.

⁶⁶ Tradução livre. Texto original: 'that the electron spin cannot be measured by classically describable experiments (as, for instance, deflection of molecular beams [of electrons] in external electromagnetic fields) and must therefore be considered an essentially quantum mechanical property of the electron'.

⁶⁷ Até então foram apresentados modelos que atualmente são conhecidos como semi-clássicos.

Entretanto os modelos elaborados nesse período apresentavam diversas fragilidades tanto de natureza metodológica quanto epistemológica, dessa forma era preciso abordar esses problemas por meio de ideias inovadoras.

Por volta do início da década de 1920, houve tentativas de apresentar uma formulação matemática que descrevessem de forma coerente o comportamento discreto das grandezas quânticas. Em 1925, Heisenberg, Max Born (1882-1970), e Pascual Jordan (1902-1980) e independentemente Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) formularam esquemas matemáticos consistentes da mecânica quântica que forneciam os resultados empíricos corretamente. No início de 1926 Erwin Schrödinger (1887-1961) apresentou sua contribuição para a mecânica quântica por meio do desenvolvimento de mecânica ondulatória (SEGRÉ, 1987, MEHRA, 2001). Posteriormente essas três formulações matemáticas, aparentemente diferentes para a mecânica quântica foram reconhecidas como formulações matemáticas de uma mesma teoria e, portanto, eram equivalentes.

Consideramos as três formulações para a Mecânica Quântica igualmente importantes historicamente, porém nesse trabalho trataremos apenas da mecânica ondulatória proposta por Schrödinger, por se tratar da formulação mais abordada nos cursos de graduação em Física.

Segundo Segrè (1987) a aceitação e o sucesso do modelo de Schrödinger em detrimento a modesta aceitação da formulação matricial desenvolvida majoritariamente por Heisenberg tenha sido devido ao fato de que a matemática utilizada por Schrödinger ser familiar aos físicos visto que sua matematização não diferia dos modelos ondulatórios clássicos. Esse argumento também pode ser um motivo plausível para a abordagem quase que exclusiva dessa formulação nos cursos de graduação em Física.

6.1.7.1 Erwin Schrödinger: O Desenvolvimento Da Mecânica Ondulatória

Erwin Schrödinger (1887-1961) nasceu e estudou em Viena, local onde a influência de Boltzmann permanecia presente, foi aluno de Fritz Hasenoehrl (1874-1915) que fora ex-aluno de Boltzmann. Lamentavelmente Hasenoehrl morreu em combate durante a Primeira Guerra Mundial. Schrödinger também lutou durante a guerra, após seu término trabalhou em diversas universidades até por fim se estabelecer na Universidade de Zurique, local onde desenvolveu umas das suas

principais obras (SEGRE, 1987).

Seu interesse pela abordagem ondulatória pode ser considerada uma consequência do estudo da tese de Louis De Broglie (1892-1987). Schrödinger conheceu as ideias de De Broglie por meio de uma referência a esse trabalho, feita por Einstein em um dos seus trabalhos a respeito do estudo estatístico dos gases⁶⁸ (MARTINS, 2011; MEHRA, 2001; SEGRE, 1987). A referência feita por Einstein ao trabalho de De Broglie atraiu a atenção de Schrödinger devido a dois aspectos apresentados. Em primeiro lugar Einstein observou que a ideia de ondas de fase associadas a moléculas de um gás fornecia uma solução para o chamado paradoxo de Gibbs e em segundo lugar, em uma nota de rodapé em seu trabalho Einstein afirmou que De Broglie apresentava uma interpretação para as condições quânticas de Bohr-Sommerfeld. Quando Schrödinger finalmente teve acesso a tese de De Broglie analisou detalhadamente principalmente as informações a respeito desses dois aspectos (MEHRA, 2001).

Após estudar a tese de De Broglie, Schrödinger considerou a interpretação para as condições quânticas de Bohr-Sommerfeld apresentada, o resultado mais notável e por esse motivo começou a pensar em aplicar as hipóteses de De Broglie a outros problemas atômicos. Aproximadamente duas semanas após estudar a tese de De Broglie escreveu a Landé:

Durante os últimos dias estive profundamente envolvido nas engenhosas teses de Louis de Broglie. É extraordinariamente estimulante; no entanto, certos pontos são ainda muito difíceis de compreender. Tenho tentado em vão visualizar a onda de fase de um elétron nas órbitas de Kepler. Os 'raios' correspondem certamente a elipses vizinhas de Kepler que têm a mesma energia. Isto, contudo, leva a 'cáusticos' horríveis ou algo semelhante, para a frente de onda. Por outro lado, a onda deve ter uma extensão em comprimento determinada por um período Zeeman ou Stark⁶⁹ (Schrödinger a Lande, 16 novembro 1925, apud MEHRA, 2001, p. 767, tradução nossa).

6.1.7.2 Contribuições de Louis De Broglie: As ondas de fase

O aristocrata Príncipe Louis De Broglie (1892-1986) descendia de uma família

⁶⁸ Conhecida atualmente como estatística de Bose-Einstein.

⁶⁹ Tradução livre. Texto original: 'About two weeks after he had obtained the thesis, he wrote to Alfred Lande in Tubingen: 'During the last few days I have been deeply involved in Louis de Broglie's ingenious *Theses*. It is extraordinarily stimulating; however, certain points are still very hard to understand. I have tried in vain to visualize the phase wave of an electron on Kepler orbits. The 'rays' certainly correspond to neighboring Kepler ellipses having the same energy. This, however, leads to horrible 'caustics' or the like, for the wave front. On the other hand, the wave should have an extension in length determined by a Zeeman or Stark period'.

que exerceu grande influência na história da França pois a ela pertenceram vários marechais, embaixadores e ministros. Seu irmão mais velho Duque Maurice De Broglie teve uma carreira de destaque na física e foi um dos primeiros a realizar estudos clássicos a respeito dos raios X. O interesse inicial de Louis De Broglie foi pela história, porém aos poucos foi se afastando dessa atividade. Em 1911 conheceu por meio do irmão, os problemas relacionados a natureza da luz, radiação e os quanta o que lhe despertou forte interesse, e por isso iniciou seus estudos em Física se dedicando principalmente a questão da natureza dual da luz (SEGRE, 1987).

A sua mais importante contribuição, a qual trataremos neste trabalho, foi apresentada por Louis De Broglie por meio de diversos artigos publicados entre 1923 e 1924 e sua tese de doutorado. A ideia central de seus trabalhos consistia em considerar que todas as partículas sofrem algum tipo de processo periódico que obedecem às equações de energia da relatividade e dos estudos quânticos⁷⁰. Além disso, reconheceu que sua hipótese só seria capaz de obedecer a teoria da relatividade geral se todos os quanta fossem considerados como sistemas espacialmente extensos e não como partículas pontuais, por isso considerou o elétron como um sistema infinito (MARTINS, 2011).

A partir das considerações em relação ao elétron supracitadas, De Broglie supôs que todo sistema espacialmente infinito do elétron, em seu referencial de repouso, pulsava com uma frequência $h\nu_0 = m_0 c^2$ e esse sistema periódico poderia ser descrito por uma equação de onda

$$\Psi_0 = A 2\pi(\nu_0 t_0)$$

Equação 8: Função de onda utilizada para descrever o processo periódico do elétron.

utilizando a transformação de Lorentz para o tempo e substituindo na Equação 8 ele demonstrou que a o processo periódico do elétron em seu referencial de repouso se transforma em uma onda monocromática, a onda de fase, em relação a outros referenciais. Seguindo esse raciocínio, de acordo com Martins (2011)

O elétron livre em movimento seria equivalente a um sistema extenso, com uma forte concentração de energia em torno de um centro, viajando a uma velocidade v e, ao mesmo tempo, atravessado por uma onda monocromática de velocidade $V=c^2/v$ e frequência $\nu = mc^2/h$ (MARTINS, 2011,p.398).

⁷⁰ As equações citadas são: $E=mc^2$ e $E=h\nu$ respectivamente.

Outro resultado importante obtido por De Broglie, foi sua interpretação para as condições de quantização de Bohr- Sommerfeld. Ao abordar a questão do átomo de hidrogênio supôs que o centro do elétron obedecia a mecânica clássica e por isso o elétron deveria seguir uma trajetória de Kepler assim a onda seguiria a mesma trajetória clássica. Considerando que a onda sempre estivesse em fase com as oscilações do elétron De Broglie demonstrou as regras de quantização de Bohr-Sommerfeld como uma consequência de suas hipóteses (MARTINS, 2011) e explicou:

Depois de termos recordado as leis de estabilidade para as trajetórias quantificadas, as resultantes de numerosos trabalhos recentes, demonstramos que se pode interpretá-las como expressão da ressonância da onda de fase no comprimento da fase fechada ou trajetória quase-fechada. Acreditamos que esta é a primeira explicação, fisicamente plausível, proposta para estas condições de estabilidade de Bohr e Sommerfeld⁷¹ (DE BROGLIE, 1925, p. 126, apud MEHRA, 2001, p. 767).

Uma importante correspondência empírica prevista pelas hipóteses de De Broglie foi a difração de elétrons, que foi determinada em 1927 por Davisson e L. H. Germer e identificaram que os comprimentos de onda associados ao elétron obedeciam a equação prevista por De Broglie (MARTINS, 2011; SEGRE, 1987).

6.1.7.3 *Schrödinger e a equação de onda relativística*

As observações expressas em sua correspondência com Landé⁷², evidenciam que Schrödinger buscou primeiramente obter um esquema geométrico das ondas de fase de De Broglie em situações mais complexas do átomo de hidrogênio sob a influência de campos elétricos e magnéticos (MEHRA, 2001). Em seus trabalhos, De Broglie apenas apresentou uma representação geométrica para o caso do átomo de hidrogênio representando as órbitas das partículas, do centro e do elétron (não relativista), e as ondas de fase associadas a elas (MEHRA, 2001; MARTINS 2011).

No entanto Schrödinger se interessou profundamente na interpretação e representação geométrica e queria investigar toda a extensão de consequências da

⁷¹ Tradução livre. Texto original: 'After having recalled the laws of stability for the quantized trajectories, those resulting from numerous recent papers, we have shown that one can interpret them as expressing the resonance of the phase wave on the length of the closed or quasi-closed trajectory. We believe that this is the first explanation, which is physically plausible, proposed for these stability conditions of Bohr and Sommerfeld'.

⁷² Citada na seção 2.3.7.1.

representação ondulatória dos elétrons. Não há documentos disponíveis que evidenciem os resultados obtidos a partir das representações geométricas, no entanto se suspeita que logo após escrever a Landé, Schrödinger desistiu dessa abordagem e se dedicou a outra mais promissora usando uma equação de onda para a onda de fase (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011).

Inicialmente Schrödinger elaborou uma equação de onda relativística para o átomo de hidrogênio utilizando a abordagem de De Broglie, a dedução para essa equação não foi publicada, mas pôde ser encontrada em um memorando de três páginas elaborado no final de 1925 (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011). Em uma primeira comparação superficial da equação relativística elaborada por Schrödinger com os resultados de Sommerfeld a respeito dos estudos relativísticos do átomo de hidrogênio, elas pareciam estabelecer entre si uma estreita equivalência. Porém uma análise mais detalhada revelou que a equação relativística de Schrödinger forneciam valores energéticos diferentes dos obtidos por Sommerfeld, que conseqüentemente divergiam dos resultados experimentais (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011).

Ao se deparar com resultados energéticos diferentes dos identificados experimentalmente, Schrödinger durante algum tempo se empenhou a fazer modificações em sua equação com o objetivo de determinar resultados satisfatórios, o que de fato não aconteceu (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011). Em relação a esse fato, Dirac recordou décadas mais tarde que Schrödinger disse a ele:

E quando Schrödinger encontrou este resultado errado, ficou extremamente desapontado. Ele pensou que toda a sua ideia não era nada boa, e abandonou-a [Dirac relatou em 1981, continuando]: Foi alguns meses mais tarde quando voltou a este trabalho, e notou que na aproximação não-relativista o resultado dos seus cálculos concordava com a observação, que ele publicou o seu trabalho, portanto, como uma teoria não-relativista ⁷³ (MEHRA, 2001. p. 770).

Durante algum tempo Schrödinger interrompeu o seu trabalho na equação de onda e se dedicou a outros trabalhos, a saber: terminou seu trabalho a respeito do estudo dos gases de Einstein e se dedicou também a um trabalho com um assunto completamente diferente, a investigação a respeito da “teoria da cor”, o que pode ter proporcionado a ele um distanciamento (talvez muito benéfico) dos problemas de seus

⁷³ Tradução livre. Texto original: ‘And when Schrodinger found this wrong result, he was excessively disappointed. He thought his whole idea was not good at all, and he just abandoned it [Dirac reported in 1981, continuing]: It was some months later when he went back to this work, and noticed that in nonrelativistic approximation the result of his calculation did agree with observation, that he published his work therefore as a nonrelativistic theory’.

estudos atômicos (MEHRA, 2001).

Logo depois do término e publicação dos trabalhos mencionados acima, em especial nas férias de Natal de 1925, Schrödinger voltou a se dedicar aos estudos atômicos, e nesse período conseguiu elaborar uma solução para os problemas atômicos se limitando ao caso não-relativista (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011).

6.1.7.4 A equação de onda não relativística

No início de 1926, mais precisamente nos dias 27 de janeiro e 23 de fevereiro Schrödinger publicou dois trabalhos na *Annalen der Physik*, intitulados “Quantisierung als Eigenwertproblem” (Quantização como um problema de Autovalores) e “Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung)” (Quantização como um problema de Autovalores, Parte II). Esses dois trabalhos constituíam os dois primeiros de uma série de seis trabalhos (MEHRA, 2001).

Em seu primeiro trabalho Schrödinger apresentou sua equação de onda e demonstrou suas deduções matemáticas das soluções aplicadas ao problema do hidrogênio não relativístico. Ele pretendia também eliminar a arbitrariedade das condições quânticas da estrutura atômica e afirmou que elas poderiam ser derivadas mais profundamente por meio de um princípio fundamental, argumentando que as características ondulatórias de sistemas mecânicos poderiam originar as condições quânticas nos sistemas atômicos. Assim Schrödinger escreveu no início de seu trabalho:

Neste trabalho, desejo considerar, primeiro, o caso mais simples do átomo de hidrogênio (não-relativista e não-perturbado), e mostrar que as condições quânticas habituais podem ser substituídas por outro postulado, no qual a noção de "números inteiros", apenas como tal, não é introduzida. [...] Pelo contrário, quando a integralidade aparece, ela surge da mesma forma natural que no caso dos números de nós de uma corda vibratória. A nova concepção é capaz de generalização, e ataca, creio eu, muito profundamente a natureza das regras quânticas⁷⁴ (SCHRÖDINGER, 1928, p. 1 apud MEHRA, 2001, p. 779, tradução nossa).

⁷⁴ Tradução livre. Texto original: ‘In this paper I wish to consider, first, the simplest case of the hydrogen atom (nonrelativistic and unperturbed), and show that the customary quantum conditions can be replaced by another postulate, in which the notion of "whole numbers," merely as such, is not introduced. [...] Rather when the integralness does appear, it arises in the same natural way as it does in the case of *node numbers* of a vibrating string. The new conception is capable of generalization, and strikes, I believe, very deeply at the nature of the quantum rules’.

A fim de alcançar seu objetivo de elaborar uma derivação para os números quânticos no caso do átomo de hidrogênio não relativístico, apresentou a dedução do de seus resultados obtidos relacionando o princípio Hamiltoniano da mecânica clássica com ideia da equação de onda (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011). Assim, o descreveu como um problema variacional para um caso geral dinâmico-quântico por meio de uma equação diferencial parcial da hamiltoniana, como descrito pela equação 9:

$$H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E$$

Equação 9: Equação diferencial parcial da hamiltoniana.

Em que H denota a função hamiltoniana em função das variáveis de posição q e as variáveis de momento $p = \frac{\partial S}{\partial q}$, e E denota a energia do sistema. Além disso admitiu que havia uma solução para a equação 9 tal que S poderia ser dada por uma soma de funções cada uma delas dependendo apenas de uma variável q , e substituiu a função clássica S por uma nova função Ψ por meio da relação:

$$S = K \log \log \Psi$$

Equação 10: Relação entre a função S e a função Ψ introduzida por Schrödinger.

Realizando a referida substituição, Schrödinger afirmou que a equação 10 expressa em termos da nova função Ψ (no caso não relativístico) “sempre pode ser transformada de modo a se tornar uma forma quadrática (de Ψ e de suas derivadas) igualada a zero” (SCHRÖDINGER, 1926a, p. 361-362; 1929, p. 1 apud MARTINS, 2011, p. 402). E em relação a função Ψ argumentou:

Procuramos uma função, Ψ de tal forma que para qualquer variação arbitrária dela a integral da referida forma quadrática, tomada sobre todo o espaço de coordenadas, é estacionária, Ψ sendo em toda parte real, de valor único, finita, e continuamente diferenciável até à segunda ordem⁷⁵ (SCHRÖDINGER, 1926, p.362, apud MEHRA, 2001, p. 779).

Dessa forma, enfatizou que as condições quânticas obtidas anteriormente,

⁷⁵ Tradução livre. Texto original: ‘We seek a function Ψ , such that for any arbitrary variation of it the integral of the said quadratic form, taken over the whole coordinate space, is stationary, Ψ being everywhere real, single-valued, finite, and continuously differentiable up to the second order’.

segundo ele arbitrariamente, deveriam ser substituídas pelo problema variacional citado acima (MEHRA, 2001; MARTINS, 2011). A partir dessa consideração deduziu a equação de onda para o átomo de hidrogênio:

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi = 0$$

Equação 11: Equação de Schrödinger não relativística para o átomo de hidrogênio.

A equação 11 representa, portanto, a equação diferencial de segunda ordem da função de onda Ψ , proposta por Schrödinger para descrever por meio da abordagem ondulatória o átomo de hidrogênio não relativístico. Segundo Mehra (2001), Schrödinger havia considerado a função de onda Ψ desde dezembro do ano anterior. E havia concluído por meio de seus estudos que essa função possuía uma propriedade particular, a saber: soluções aceitáveis pareciam existir apenas para determinados valores de energia E . Comparando o princípio variacional com a equação diferencial (que ficou posteriormente conhecida como Equação de Schrödinger) ele foi capaz de demonstrar que a função Ψ pode gerar soluções aceitáveis para todos os valores positivos E , mas apenas valores discretos para os negativos (MEHRA, 2001).

Conhecendo as propriedades de Ψ , Schrödinger apresentou uma descrição matemática detalhada a respeito das questões envolvidas na solução da Equação 11, para abordar essa questão ele transferiu o seu tratamento para coordenadas polares (r, θ, ϕ) e então admitiu que a função Ψ poderia ser escrita como um produto de três funções cada uma delas apenas de r, θ ou ϕ . Dessa forma relacionou os números inteiros provenientes de seu tratamento para o átomo de hidrogênio por meio de um problema variacional com os números quânticos obtidos anteriormente (MEHRA, 2001).

Do ponto de vista físico, interpretou a propriedade de valores discretos para energias negativas relacionando esse espectro discretos com os termos da série de Balmer. E argumentou: “Os conhecidos níveis de energia de Bohr, correspondentes aos termos de Balmer, são obtidos se à constante K , introduzida em [Eq. (10)], por razões de dimensões, damos o valor $k = \frac{h}{2\pi}$ [...]” (SCHRÖDINGER, 1926. p. 371, apud MEHRA, 2001, 784, tradução nossa).

Ainda em seu primeiro trabalho Schrödinger indicou uma possibilidade para a interpretação física da função de onda Ψ , mencionando que a função de onda para o átomo de hidrogênio poderia ser interpretada como algum tipo de processo de vibração no átomo, e que isso se aproximaria mais da realidade do que a interpretação de órbitas eletrônicas. No entanto, em geral, seu primeiro trabalho ficou restrito a formulações matemáticas (MEHRA, 2001).

Em seu segundo trabalho estabeleceu os fundamentos para o que mais tarde ficaria conhecido como “mecânica ondulatória”. Os progressos alcançados em suas formulações se basearam em grande parte em estudo aprofundados da analogia mecânico-óptico, em que utilizou a analogia entre os princípios de Huygens e Hamilton. Assegurando assim, que a sua abordagem pudesse ser aplicada também aos casos em que as dimensões do sistema fossem comparáveis ao comprimento de onda, o que permitiria sua aplicação a sistemas atômicos. Além disso devido a sua formulação geral e abstrata, sua equação de onda também poderia ser aplicada a qualquer sistema físico. Após apresentar suas fundamentações comentou:

Encontramos aqui novamente um teorema para as ‘ondas de fase’ do elétron, que o Sr. De Broglie tinha deduzido, referindo-se essencialmente à teoria da relatividade, nessas belas pesquisas às quais devo a inspiração para meu trabalho. Vemos que o teorema em questão é de uma maior generalidade, e não surge apenas da teoria da relatividade, mas é válido para qualquer sistema conservativo da mecânica comum. (SCHRÖDINGER, 1926b, p. 498, 1929, p. 20, apud MARTINS, 2011, p. 407, tradução nossa).

Durante o processo de elaboração da mecânica ondulatória, Schrödinger manteve uma correspondência regular com seus colaboradores em Munique, o experimentalista Willy Wien e o teórico Arnold Sommerfeld. Wien que também era editor da *Annalen der Physik*, incentivou Schrödinger a enviar seus trabalhos a Munique. No entanto, Schrödinger pediu a Wien que antes de publicar seu trabalho o mostrasse para Sommerfeld, pois o considerava uma importante referência em questões teóricas. Dessa forma Wien e Sommerfeld foram os primeiros físicos a conhecer e reagir as novas ideias de Schrödinger a respeito dos sistemas atômicos (MEHRA, 2001).

Em relação as considerações feitas por esses dois físicos, em um primeiro momento Wien questionou alguns pontos a respeito da absorção e emissão de altas frequências, mas de modo geral foi muito receptivo ao trabalho de Schrödinger e o incentivou dizendo:

[...] Em qualquer caso, felicito-o pela sua realização e desejo-lhe boa sorte com todo o meu coração. Talvez agora se consiga resolver o problema

quântico que até agora parecia ser tão sem esperança⁷⁶(W. Wien a E. Schrodinger, 6 de fevereiro de 1926, apud MEHRA, 2001, p. 785, tradução nossa).

Atendendo ao pedido de Schrödinger, Wien enviou seu trabalho para Sommerfeld o que resultou na retomada quase que instantânea da correspondência entre os dois. Em uma carta datada de 29 de janeiro de 1926, Schrödinger explicou a Sommerfeld o conteúdo de seu trabalho mencionando os resultados obtidos para o rotador e o oscilador. Além disso se referiu ao problema ainda não resolvido do cálculo das intensidades e polarização das linhas espectrais. Sommerfeld ficou empolgado com as novidades de Schrödinger e escreveu em ele:

É minha impressão que o seu método substitui a nova mecânica quântica de Heisenberg, Born e Dirac (R[oyal] Soc[iety] Proceedings] 1925); em particular, um método simplificado, por assim dizer, um solucionador analítico do problema algébrico aí declarado, porque os seus resultados concordam com os deles ⁷⁷(A. Sommerfeld a E. Schrodinger, 3 de fevereiro de 1926, apud MEHRA, 2001, p. 786, tradução nossa).

Ainda nessa carta Sommerfeld questionou se não poderia existir uma analogia entre sua formulação do princípio variacional com o modelo retangular de vibração de Ritz que conduziu a equação de Ritz e fez a seguinte pergunta: “A propósito, será que as suas vibrações não estão amortecidas? Não irradiam ou a energia irradiada será substituída?” (A. Sommerfeld a E. Schrödinger, 3 de fevereiro de 1926, apud MEHRA, 2001, p. 786, tradução nossa).

Estimulado pela sugestão, Schrödinger analisou o trabalho de Ritz e após duas semanas respondeu a Sommerfeld que não acreditava haver relação entre as duas formulações. Apesar do modelo de Ritz não ter contribuído diretamente na formulação da equação de onda, o seu estudo permitiu a Schrödinger analisar mais profundamente o significado das vibrações atômicas. Ao mesmo tempo que tentava responder à pergunta de Sommerfeld a respeito do amortecimento das vibrações escreveu:

As Ψ -vibrações não são naturalmente vibrações eletromagnéticas no sentido antigo. Entre elas deve existir algum acoplamento, correspondente ao

⁷⁶ Tradução livre. Texto original: ‘In any case, I congratulate you on your achievement and wish you good luck with all my heart. Perhaps one will now succeed in solving the quantum problem which up tonow seemed to be so hopeless’.

⁷⁷ Tradução livre. Texto original: ‘It is my impression that your method is a substitute for the new quantum mechanics of Heisenberg, Born, and Dirac (R[oyal] Soc[iety] Proceedings] 1925); in particular, a simplified method, so-to-speak, an analytic resolvent of the algebraic problem stated there, because your results agree with theirs’.

acoplamento entre os vectores do campo eletromagnético e a corrente tetradimensional nas equações de Maxwell-Lorentz. No nosso caso, as vibrações Ψ correspondem à corrente tetradimensional, ou seja, a corrente tetradimensional deve ser substituída por algo derivado da função Ψ , digamos o gradiente tetradimensional de Ψ . Mas tudo isto é a minha fantasia; na realidade, ainda não pensei bem no assunto. [...] A propósito, a minha apresentação geral ainda se aproxima dos seus desejos num segundo ponto, nomeadamente no que diz respeito à "realidade física das vibrações Ψ ". Uma vez que Ψ em geral depende de muito mais de três variáveis, a interpretação imediata como vibrações no espaço tridimensional é dificultada de qualquer forma desejável ⁷⁸(E. Schrodinger a A. Sommerfeld, 20 de fevereiro de 1926, apud MEHRA, 2001, p. 787, tradução nossa).

Ainda nessa carta Schrödinger agradece as contribuições dadas por Sommerfeld e expressa sua admiração dizendo: "Mais uma vez obrigado, Professor muito venerado, pelo seu amável interesse, e por uma centena de assistências diretas e indiretas que devo a você" ⁷⁹(E. Schrodinger a A. Sommerfeld, 20 de fevereiro de 1926, apud MEHRA, 2001, p. 787, tradução nossa).

A questão da interpretação do significado da função de onda Ψ perdurou durante algum tempo, Schrödinger propôs posteriormente que o quadrado do módulo de Ψ poderia ser interpretado como a densidade de carga elétrica, ou seja, como se o elétron se dissolvesse em uma determinada região (SEGRE, 1987).

Os trabalhos de Schrödinger foram apreciados pelos físicos de Copenhague, no entanto a sua interpretação para a função de onda Ψ foi rejeitada, pois se acreditava que os elétrons se localizavam em áreas do espaço muito pequenas, podendo ser consideradas quase como pontos (SEGRE, 1987).

Apenas em 1926, foi estabelecida uma interpretação consistente para Ψ por Max Born. Born interpretou o quadrado do módulo de Ψ como a densidade de probabilidade de se encontrar o elétron em uma determinada região, ou seja, de acordo com sua interpretação as soluções da equação de Schrödinger não fornecem

⁷⁸ Tradução livre. Texto original: 'The Ψ -vibrations are naturally not electromagnetic vibrations in the old sense. Between them some coupling must exist, corresponding to the coupling between the vectors of the electromagnetic field and the four-dimensional current in the Maxwell-Lorentz equations. In our case the Ψ -vibrations correspond to the four-dimensional current, that is, the fourdimensional current must be replaced by something that is derived from the function Ψ , say the four-dimensional gradient of Ψ . But all this is my fantasy; in reality, I have not yet thought about it thoroughly. [...] 'By the way, my general presentation still approaches your wishes on a second point, namely with respect to the "physical reality of the Ψ -vibrations." Since in general depends on many more than three variables, the immediate interpretation as vibrations in the three-dimensional space is made difficult in any desirable manner'.

⁷⁹ Tradução livre. Texto original: 'Thank you again, highly revered Professor, for your kind interest, and for a hundredfold direct and indirect assistance which I owe to you'.

trajetórias (ou órbitas) mas sim a probabilidade da localização do elétron e outros corpos atômicos e subatômicos (SEGRE, 1987; FREIRE JR.; NETO, 1997).

A interpretação probabilística feita por Born causou um certo desconforto na comunidade científica, ele tinha plena consciência que sua proposta causaria um problema conceitual e filosófico profundo na área da Física devido ao abandono de determinismo. Uma descrição determinista se refere a uma descrição que é capaz de prever, a partir das condições iniciais ou de contorno, a posição e velocidade de um corpo em qualquer instante. Um exemplo de uma descrição determinística é a Mecânica Newtoniana (FREIRE JR; NETO, 1997). É importante destacar, que o uso de probabilidades no formalismo da MQ, não é decorrente de insuficiência de informações ou limitações técnicas de instrumentos de medida. O uso das probabilidades é uma característica da teoria física em questão (FREIRE JR; NETO, 1997; GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001).

6.1.8 O Princípio de Incerteza

A interpretação proposta por Max Born a respeito da função de onda em 1926, deu início a profundas discussões a respeito do significado físico das formulações da Mecânica Quântica. Formulações essas que dizem respeito tanto a formulação ondulatória quanto a matricial (MEHRA, 2001, SEGRÉ, 1987).

Heisenberg, um dos elaboradores da formulação matricial, defendia fortemente o abandono da utilização de conceitos clássicos como as órbitas dos elétrons em átomos. E começou a se preocupar com o problema de interpretação em 1925, quando pensava a respeito da existência simultânea de espectros discretos de energia para átomos ligados em átomos e espectros contínuos para elétrons livres e lhe ocorreu que faria sentido pensar em uma descrição de espaço-tempo para os elétrons ligados a átomos (MEHRA, 2001).

No outono de 1926, Heisenberg voltou a se preocupar com a descrição do espaço temporal para descrever átomos ligados. Em discussões com Pauli, este salientou que a função de onda de Schrödinger poderia ter considerada no espaço de momento $\Psi(p)$ tanto quanto uma coordenada de espaço $\Psi(q)$, em relação a esse argumento Heisenberg respondeu:

“A equivalência fundamental de p e q me agrada muito. Assim, na formulação ondulatória, a equação $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$ corresponde sempre ao

fato de que não faz sentido falar de uma onda monocromática num momento definido (ou num intervalo de tempo muito pequeno) (apud MEHRA, 2001, p. 659).

Em resposta a essa afirmação Pauli respondeu: *“Também não faz sentido falar de um estado (energia) num intervalo de tempo que é pequeno em comparação com o período [porque o estado ou a energia só podem ser definidos ao longo de todo o período]”* (apud MEHRA, 2001, p. 659, tradução nossa). Ao que Heisenberg continuou afirmando que:

Se a linha [espectral] pode ser tomada como não muito nítida, ou seja, o intervalo de tempo não é muito pequeno, isso faz naturalmente sentido. Analogamente, não há sentido em falar a respeito da posição de uma partícula de velocidade definida. No entanto, faz sentido se não se considerar a velocidade e a posição com grande precisão. É bastante claro que, macroscopicamente, é significativo falar sobre a posição e velocidade de um corpo (apud MEHRA, 2001, p. 659, tradução nossa).

Em 1926, Heisenberg estava em Copenhague e discutia diariamente com Bohr a respeito do problema da interpretação. No entanto Bohr estava desenvolvendo sua própria abordagem que enfatizava a dualidade onda-partícula na representação da Teoria Quântica. Por sua vez Heisenberg decidiu permanecer considerando a formulação matricial tal como formulada por ele, Born, Jordan e Dirac (MEHRA, 2001).

Em fevereiro de 1927, durante uma viagem de Bohr a Noruega, Heisenberg permaneceu em Copenhague e se dedicou em retomar seus esforços ao problema e colocar alguma ordem em seus pensamentos e resultados dos últimos meses (MEHRA, 2001; PESSOA JR, 2003). E em 23 de fevereiro enviou uma longa carta a Pauli, e afirmou que a “[...] ‘relação de comutação’, $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$, tem a seguinte interpretação física: Dado o momento exato p de um elétron num átomo, a sua posição q é então completamente indeterminada, e vice-versa” (apud MEHRA, 2001, p.661, tradução nossa).

Nessa carta, ele pediu a Pauli sua opinião e suas sinceras críticas a respeito de sua interpretação. Pauli aceitou de imediato as ideias de Heisenberg em relação ao Princípio de Incerteza, e considerou que essa interpretação proporcionava a MQ uma mecânica coerente em relação aos seus significados (MEHRA, 2001).

Destacamos ao final dessa seção, que de acordo com Pessoa Jr. (2003) há a necessidade de distinguir os termos “Princípio de Incerteza” e “Relações de Incerteza”. O primeiro se refere a grandezas não compatíveis entre si, em que uma maior previsibilidade de uma implica em uma diminuição de previsibilidade da outra. O segundo termo se refere a qualquer relação matemática que represente esse

princípio (PESSOA JR, 2003).

6.1.9 A interpretação de Complementaridade

Ao final de 1926, o problema de interpretação das formulações quânticas era um tema recorrente nas discussões entre Bohr e Schrödinger, em Copenhague (MEHRA, 2001; PESSOA JR, 2003). O objetivo de Bohr era elaborar uma interpretação com uma orientação filosófica geral para a teoria quântica, independente do formalismo matemático utilizado. Dessa forma, se tratava de interpretar a teoria como um todo, para que ela pudesse se justificar como tal (FREIRE JR; NETO, 1997; MEHRA, 2001).

Bohr formulou com esse intuito, o que ele denominou “Interpretação de Complementaridade”. De acordo com essa interpretação duas grandezas são ditas complementares quando a medida de uma delas impede a medição simultânea e acurada de outra, ou seja, grandezas complementares não podem ser definidas simultaneamente (MEHRA, 2001; PESSOA JR, 2003). O princípio de incerteza é um exemplo de expressão da complementaridade, pois impossibilita a definição simultânea de posição e momento (FREIRE JR; NETO, 1997)

A interpretação da complementaridade, exclui a possibilidade de um fenômeno físico exibir ambos os aspectos, de onda e partícula, simultaneamente (PESSOA JR, 2003).

A mecânica Quântica teve como um dos marcos inaugurais a V Conferência de Solvay, realizada em Bruxelas em 1927, na qual Bohr apresentou sua interpretação. Essa reunião ficou marcada pelos debates que aconteceram entre Einstein e Bohr a respeito dos aspectos conceituais e epistemológicos da nova teoria (FREIRE JR.; NETO, 1997).

6.1.10 O Modelo Ondulatório de Átomo

A representação que usualmente temos em relação ao átomo, geralmente é fortemente influenciada por seus modelos clássicos e semi-clássicos (modelo Bohr-Sommerfeld), em que o elétron pode se encontrar em diferentes níveis de energia bem definidos, e a transição entre esses níveis é feita por meio de “saltos”. Esses modelos também consideram em suas descrições conceitos clássicos como o de trajetória ou

“órbita”, em detrimento ao modelo de densidade de probabilidade (Figura 1) (PESSOA JR, 2003; SEGRE, 1987).

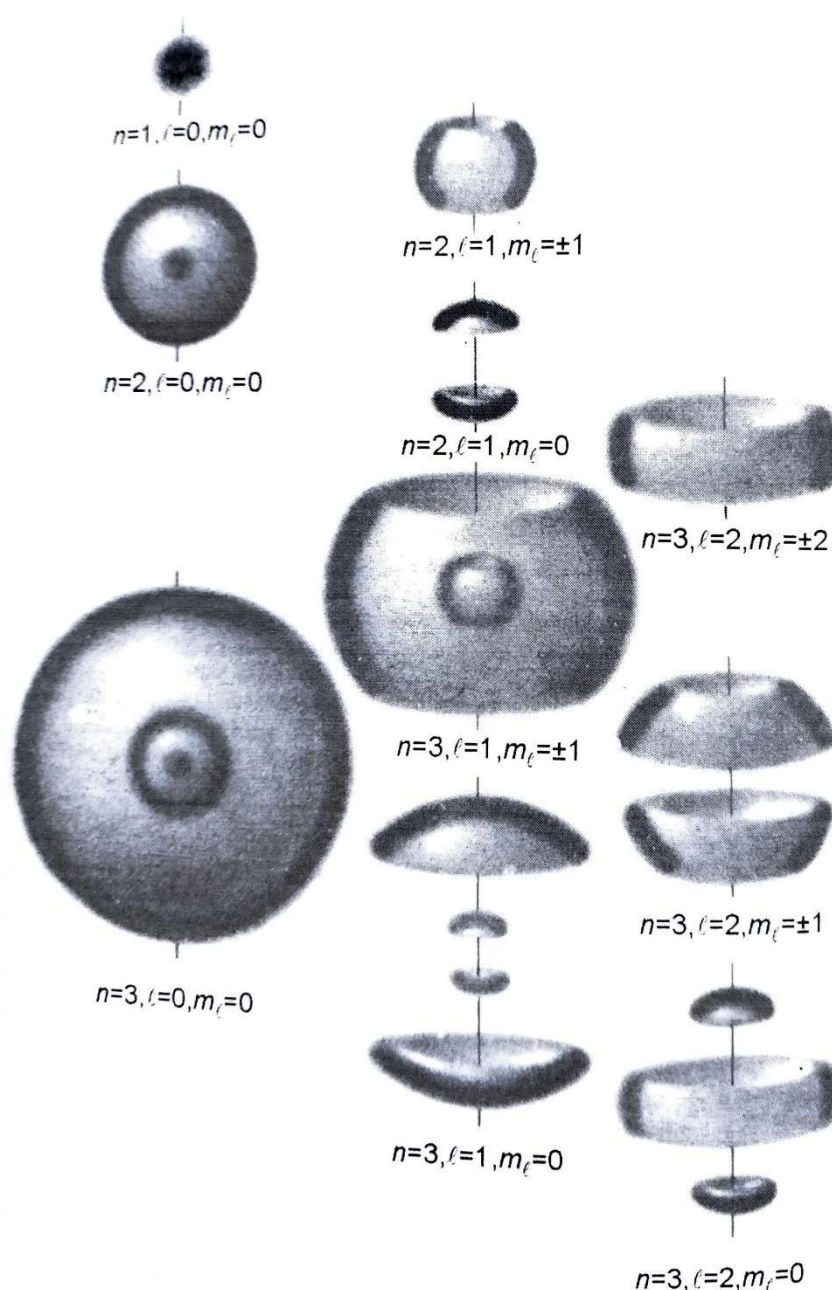


Figura 3: Representação das ondas de probabilidade de um átomo de hidrogênio, cada qual correspondendo a um estado possível. O número quântico n designa auto-estados de energia; l designa auto-estados de momento angular total; m_l de componentes do momento angular na direção z . Cada um desses auto-estados pode ser populado por dois elétrons, cada qual com um número quântico m_s de spin diferente. Note que para um dado n e l , a soma dos auto-estados (para diferentes m_l) é esfericamente simétrica. Fonte: PESSOA JR., 2003. p. 118).

No entanto, de acordo com a MQ ondulatória os níveis de energia discretos dos

elétrons correspondem a autoestados sem posição definida. Um autoestado é definido como uma solução aceitável da equação de Schrödinger, que por sua vez pode ser descrita por uma função de onda Ψ . Além de não possuir uma posição bem definida, os autoestados (ou estados estacionários) também não possuem energia definida, pois o átomo pode também se encontrar em uma superposição de estados.

De acordo com Pessoa Jr (2003) a superposição de estados é um dos princípios fundamentais da MQ e é definido como: “Dados dois estados admissíveis de um sistema quântico, então a soma desses dois estados também é um estado admissível do sistema” (PESSOA JR, 2003, p.23).

Até o ano de 1927, nenhuma das formulações da Mecânica Quântica era relativística, como vimos a tentativa de Schrödinger nesse âmbito tinha chegado a resultados que não condiziam com os resultados experimentais. Em 1928 Paul Adrien Maurice Dirac, a partir da análise da equação relativística de Schrödinger, conseguiu determinar uma equação de onda relativisticamente invariante para o elétron. Identificou por meio das consequências matemáticas, que o elétron deveria possuir um novo grau de liberdade interno, que parecia possuir todas as propriedades do spin, como Dirac recordou anos mais tarde:

Schrödinger explicou-o [a história do seu tratamento da equação relativista] muitos anos mais tarde, durante uma pequena conversa que tivemos, e ele disse que obteve pela primeira vez a sua equação da onda como uma generalização da equação de Broglie, referindo-se a um electrão em movimento num campo eletromagnético. Esta equação que obteve pela primeira vez foi uma equação relativista. Obteve um resultado não concordante com a observação. E depois, claro, aplicou-a ao electrão no átomo de hidrogênio. A razão pela qual não concordou com a observação foi que não havia nele qualquer referência ao spin do elétron. As pessoas tinham acabado de começar a pensar no spin naqueles dias, e ainda não tinham criado qualquer teoria detalhada que o envolvesse. A equação original da onda de Schrödinger não tinha qualquer referência ao spin e, portanto, forneceu o resultado errado⁸⁰ (DIRAC, 1983, p. 740-741 apud MEHRA, 2001, p. 770, tradução nossa).

Dessa forma, Dirac conseguiu englobar em sua equação os quatro números

⁸⁰ Tradução livre. Texto original: ‘Schrodinger explained it [the story of his treatment of the relativistic equation] many years later, during a little conversation we were having, and he said that he first obtained his wave equation as a generalization of the de Broglie equation, referring to an electron moving in an electromagnetic field. This equation which he first got was a relativistic one. He got a result not in agreement with observation. And then, of course, he applied it to the electron in the hydrogen atom. The reason it did not agree with observation was that there was no reference in it to the spin of the electron. People had just begun to think about the spin in those days, and had not yet set up any detailed theory involving it. Schrodinger's original wave equation had no reference to spin at all and therefore gave the wrong result’.

quânticos para o elétron fornecendo nesse caso resultados empiricamente coerentes quando aplicados ao átomo de hidrogênio.

6.2 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

A seguir apresentamos a descrição das atividades da abordagem didática proposta, que tem como objetivo abordar o tema Números Quânticos na formação inicial de professores de Física com enfoque histórico-conceitual. Justificamos a relevância da proposta de uma abordagem histórico-conceitual pela falta de registros⁸¹, referentes a questão 1 proposta aos licenciandos, que indica que nenhum deles tiveram abordagens histórico ou histórico-filosóficas em seus cursos de Introdução a Mecânica Quântica.

Assim, considerando também a importância e potencialidades para o ensino, consideramos pertinente uma proposta de abordagem histórico-conceitual como alternativa para a formação de professores de Física. Pois, para que a inserção da Física Quântica no Ensino Médio ocorra efetivamente é necessário privilegiar seus aspectos qualitativos, conceituais, filosóficos e culturais em detrimento do enfoque centrado no formalismo matemático (SILVA; ALMEIDA, 2011).

A abordagem proposta tem duração prevista de 14 horas-aula, ou 700 minutos e é composta por duas UD. No entanto destacamos, de acordo com Zabala (1998), que a abordagem e as UD podem ser adaptadas de acordo com os objetivos e o contexto em que será aplicada e desenvolvida.

Essa abordagem pode ser desenvolvida ou adaptada de acordo com o contexto de sua aplicação, em cursos complementares, pode ser ofertada em disciplinas de Estágio supervisionado e/ou Metodologia e Práticas de Ensino, pode ser também aplicada em cursos de formação em Residências Pedagógicas, ou no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência - PIBID. Além das sugestões citadas, a abordagem pode ser adaptada para que seja desenvolvida juntamente com as disciplinas regulares.

Decidimos separar a abordagem em duas UD, na primeira UD abordamos o conceito de números quânticos fenomenologicamente de acordo com sua sequência histórica que apresenta apenas modelos semi-clássicos. Na segunda UD, abordamos

⁸¹ Discussão apresenta na seção 5.1 trabalho.

as elaborações e formalismos da MQ, com ênfase na mecânica ondulatória de Schrödinger e a interpretação dos números quânticos segundo essa formulação, além de apresentar alguns conceitos essenciais da MQ.

No quadro 17 estão expostas as atividades propostas e o tempo de duração sugerida para cada uma delas.

Quadro 17: Atividades propostas para as Unidades Didáticas

ATIVIDADES	DURAÇÃO	
Apresentação geral	4 min	UD1
Aplicação do questionário prévio.	30 min	
Apresentação expositiva dos fatos históricos que culminaram na elaboração do modelo atômico de Bohr.	25 min	
Momento para perguntas e discussão dos pontos relevantes da apresentação.	10 min	
Introdução ao V de Gowin	10 min	
Proposta de atividades utilizando o V de Gowin.	35 min	
Leitura com problematização do fragmento da composição histórico-conceitual: Arnold Sommerfeld: Condições de quantização adicionais	30 min	
Apresentação de vídeo a respeito do Efeito Zeeman	6 min	
Promoção de um debate a respeito da análise problematizada entre informações presentes no texto e no vídeo apresentado.	40 min	
Apresentação expositiva da descrição do sistema periódico por meio do modelo atômico de Bohr-Sommerfeld. E o modelo proposto por Bohr e Coster e modelos e hipóteses do núcleo atômico	30 min	
Leitura com problematização dos fragmentos da composição histórico conceitual “O Princípio de exclusão” e “O spin do elétron”	40 min	
Atividades envolvendo o V de Gowin	40 min	
Momento de consolidação	40 min	
Apresentação da Unidade 2	10 min	
Apresentação expositiva das formulações propostas para a Mecânica Quântica, enfatizando a proposta	30 min	

ondulatória.		UD2
Discussão dos principais pontos da apresentação, esclarecendo eventuais dúvidas	10 min	
Leitura com problematização do fragmento da composição histórico conceitual: “A equação de onda de Schrödinger”	30 min	
Atividade exploratória com aplicativo de celular: “hydrogen atom orbitals”	20 min	
Atividade envolvendo o V de Gowin	30 min	
Momento de consolidação	30 min	
Leitura com problematização dos fragmentos da composição histórico conceitual: “O princípio de Incerteza”; “A interpretação de complementaridade” e “O modelo ondulatório do átomo”.	30 min	
Promoção de debate a respeito das diferenças teóricas e conceituais entre os modelos atômicos semi-clássicos e o modelo quântico.	20 min	
Leitura dos capítulos 1 e 3 do livro “Alice no país do quantum” de Robert Gilmore	30 min	
Discussão a respeito dos fenômenos descritos nesses capítulos e suas relações com os números quânticos.	15 min	
Atividades envolvendo o V de Gowin	45 min	
Consolidação final	15min	
Questionários finais	40 min	
Encerramento	5 min	

Propomos iniciar a abordagem com uma apresentação geral, tanto do professor ou professora implementadores da abordagem, quanto dos alunos participantes. A seguir se sugere que o professor(a) ou implementador(a) da abordagem faça uma introdução geral do tema da UD, no caso Números Quânticos, e dos seus objetivos pretendidos.

Após a apresentação, é sugerido a aplicação de um questionário prévio a respeito do tema Números Quânticos (Apêndice A)⁸². A aplicação desse questionário tem o objetivo de obter os conhecimentos prévios dos participantes a respeito do

⁸² Destacamos que o questionário que será utilizado na abordagem terá as mesmas perguntas do questionário enviado aos licenciandos, com exceção da questão 8 que foi reformulada devido a fragilidade identificada na análise apresentada na seção 5.1.

assunto da abordagem. A obtenção dos conhecimentos prévios está de acordo com a Teoria de Aprendizagem Significativa, que é um dos referenciais teórico-metodológicos que norteiam essa abordagem. De acordo com aprendizagem significativa o conhecimento prévio do aprendiz é uma variável fundamental para a aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011; MOREIRA; MASINI, 1982).

A seguir ainda relacionado com a Teoria de Aprendizagem significativa, a atividade seguinte tem a função de *organizador prévio*, pois se trata de um material introdutório que pode servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que será abordado. Para essa atividade é sugerido a apresentação expositiva dos fatos históricos que culminaram na elaboração do modelo atômico de Bohr, e problematizando suas limitações. A apresentação será baseada na seção 6.1.1 da composição histórica elaborada.

Durante a apresentação expositiva citada acima, é sugerido enfatizar aspectos da Natureza do Conhecimento Científico (NDCC) presentes nos fatos históricos, como o caráter colaborativo e coletivo do processo de construção do conhecimento científico, os debates inerentes desse processo e seu caráter tentativo. Propomos abordar especificamente esses aspectos pois como identificado pela análise dos resultados empíricos⁸³ não houve nenhuma resposta, ou fragmento textual relacionado com a unidade de registro UR 2.1 que diz respeito a noção de Ciência como um conhecimento aceito por uma determinada comunidade científica em um determinado momento histórico, o que pode indicar a falta de familiaridade e até a recusa de aspectos como o processo colaborativo/ coletivo, humano e tentativo da construção do conhecimento científico, bem como a influência de aspectos histórico e sociais no desenvolvimento científico.

Outro aspecto que consideramos relevante enfatizar nesse momento é o papel da experimentação na construção do conhecimento científico. Como identificamos nos resultados empíricos, especificamente da questão 3, as noções empírico-indutivistas e verificacionista se apresentam fortemente arraigadas nos licenciandos(as) de Física. Portanto devido a esses resultados consideramos pertinente destacar na abordagem proposta, o papel da experimentação e a importância dos aspectos teóricos, na interpretação de experimentos e observações.

Nessa apresentação sugere-se enfatizar a influência de Rutherford e suas

⁸³ Disponível nas seções 5.1 e 5.2 deste trabalho.

constantes correspondências com Bohr; a influência dos trabalhos de John Nicholson na elaboração do modelo atômico de Bohr; a influência das regularidades das linhas espectrais e sua interpretação; e a recepção do modelo de Bohr pela comunidade científica. Espera-se que essa primeira atividade proporcione aos participantes uma reflexão a respeito desses aspectos da Natureza do Conhecimento Científico.

Após a apresentação expositiva é sugerido um momento de discussão a respeito dos pontos relevantes da apresentação. As atividades de apresentação expositiva, discussão e levantamento de pontos relevantes correspondem aos passos 1, 2 e 3 do exemplar 4 da UD proposta por Zabala (1998).

A seguir apresentaremos aos (as) licenciandos(as) uma introdução a respeito da organização e dos elementos que constituem o Vê epistemológico de Gowin, que nessa investigação será utilizado como instrumento de avaliação processual. Sugerimos que após a apresentação dos elementos, seja apresentados exemplos de vês que abordem assuntos que seja familiares aos(as) licenciandos(as) evidenciando novamente sua estrutura e seus elementos (NOVAK; GOWIN, 1984).

Após essa introdução será proposta uma atividade introdutória envolvendo o Vê de Gowin no qual será proposto que os licenciandos elaborem individualmente um Vê de Gowin referente a apresentação do modelo atômico de Bohr. Como material de apoio para os(as) licenciandos(as) será disponibilizado o guia com as dez questões⁸⁴ propostas por Novak e Gowin (1984). A depender da quantidade de licenciandos(as) que participarão da aplicação da abordagem sugerimos que cada licenciando(a) apresente e discuta o Vê elaborado. No caso de a turma ser muito grande os(as) licenciandos(as) podem ser divididos em grupos em que poderão apresentar seus diagramas vês, discutir e negociar significados. Em ambas os casos citados acima, será necessário a mediação e eventuais intervenções do professor(a) implementador.

A seguir, sugerimos a leitura com problematização a respeito das condições quânticas adicionais elaborada por Arnold Sommerfeld. Nessa problematização sugere-se que seja apresentado uma breve apresentação dos trabalhos anteriores realizados por Sommerfeld e seus colaboradores. Consideramos importante enfatizar os trabalhos realizados por Sommerfeld a respeito do efeito Zeeman e do efeito Zeeman anômalo e salientar que este último ainda não podia ser descrito por meio dos modelos atômicos propostos até aquele momento histórico. Essa leitura também

⁸⁴ Disponível na seção 3.2 deste trabalho.

engloba o modelo atômico proposto por Sommerfeld, a proposta de órbitas elípticas e a quantização espacial, e os resultados a respeito da estrutura fina.

Propomos enfatizar as condições de quantização adicionais propostas por Sommerfeld, em especial a quantização espacial, pelo fato de termos identificado nos resultados empíricos uma noção alternativa a respeito dos números quânticos, que considera a quantização apenas da energia, desconsiderando quantização espacial e do momento angular.

Outro aspecto interessante se deve ao fato da interpretação do experimento de Stern-Gerlach, que foi sugerido historicamente para colocar em teste a hipótese da quantização espacial e posteriormente com base em outras teorizações foi reinterpretado e associado ao conceito de spin do elétron. Novamente, podemos explorar o papel da teoria na interpretação de experimentos.

Após a leitura com as problematizações convenientes para o ensino, sugerimos a apresentação de um vídeo disponível na plataforma YouTube⁸⁵, a respeito do efeito Zeeman. Esse vídeo apresenta um pequeno relato histórico a respeito dos modelos atômicos e dos fenômenos do efeito Zeeman e do efeito Zeeman anômalo e os modelos posteriores que foram capazes de apresentar uma explicação conceitual para esses fenômenos.

Após a apresentação do vídeo consideramos pertinente promover de um debate a respeito da análise problematizada entre informações presentes no texto e no vídeo apresentado. Nesse debate sugerimos que seja enfatizado as falas anacrônicas presentes no vídeo que reforçam estereótipos a respeito da (NDCC) e que reforçam noções alternativas a respeito dos números quânticos. Nesse caso específico, chamamos atenção para a noção alternativa, identificada nos dados empíricos da questão 5, de que os números quânticos surgem diretamente da equação de Schrödinger e são elementos sem correspondência empírica.

A seguir sugerimos a apresentação expositiva (apresentação baseada nas seções 6.1.3 e 6.1.4 da composição histórico-conceitual) a respeito da descrição do sistema periódico proposto por Bohr. Após considerar as contribuições de Sommerfeld utilizando o modelo que ficou conhecido como modelo atômico de Bohr-Sommerfeld.

Sugerimos também enfatizar o trabalho colaborativo de Bohr com Kramers e apresentar brevemente o conteúdo das sete palestras Wolfskehl ministradas por Bohr.

⁸⁵ Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=4cdZMXefZx0>>.

Ainda nessa apresentação sugerimos apresentar o modelo proposto por Bohr em colaboração com Dirk Coster em que associaram os níveis energéticos atômicos em função de três números quânticos. Consideramos interessante fazer um paralelo entre os resultados obtidos pelo modelo proposto por Bohr e Coster e os resultados obtidos pelos estudos de Wentzel e Sommerfeld.

Ainda nessa apresentação consideramos pertinente apresentar a respeito da controvérsia que existiu a respeito da identificação do elemento de número atômico 72. Sugerimos ainda a apresentação a respeito do modelo do núcleo atômico e suas anomalias (como o enigma dos dupletos, o efeito Zeeman anômalo e a incoerência dos resultados de Lande com teorema de Larmor) e as hipótese *ad hoc* propostas como como a hipótese de restrição não-mecânica no acoplamento núcleo-elétron (proposto por Bohr), a hipótese de partilha do momento angular orbital do elétron de valência com o núcleo (Princípio de Partilha) ou a hipótese em que o momento angular do núcleo se ramificaria em dois autovalores durante o acoplamento com o momento angular orbital do elétron de valência (Regra de Ramificação).

Em relação aos aspectos da Natureza do Conhecimento Científico, nessa apresentação chamaremos a atenção para o aspecto colaborativo e tentativo do processo de construção do conhecimento científico.

Após a apresentação expositiva e uma possível discussão a respeito de seu conteúdo, sugerimos que seja proposto aos licenciandos uma leitura com problematização dos fragmentos da composição histórico conceitual “O Princípio de exclusão” e “O spin do elétron”⁸⁶. Propomos enfatizar o esquema proposto por Pauli, baseado nos estudos de Stoner, contendo quatro números quânticos e a ideia de que os elétrons de valência são os responsáveis pelas estruturas complexas do efeito Zeeman anômalo.

As problematizações sugeridas dizem respeito aos estudos de Pauli a respeito do efeito Zeeman anômalo e sua proposta de um modelo composto de quatro números quânticos, as correspondências de Pauli com Landé, a repulsa de Pauli pela proposta do spin do elétron, as contribuições de Uhlenbeck e Goudsmit e a influência de Paul Ehrenfest.

Consideramos de extrema importância destacar as tentativas de atribuir um significado físico ao quarto número quântico proposto por Pauli, fato que levou a

⁸⁶ Seção 6.1.5 e 6.1.6 da composição histórico-conceitual.

elaboração do conceito de spin, destacando seus aspectos fenomenológicos, além de proporcionar discussões que enfatizem o spin como um número quântico atômico. Propomos essas discussões guiados pelos resultados empíricos a respeito do conceito de spin, em que identificamos que os(as) licenciandos não consideram o spin um número quântico e frequentemente o associam a um movimento de rotação do elétron.

Depois de finalizada a leitura com as problematizações sugerimos a proposta de uma atividade utilizando o vê de Gowin, considerando as informações contidas na apresentação expositiva e na leitura com problematização a respeito dos números quânticos. Sugerimos que essa atividade seja realizada individualmente.

Após finalizada a elaboração dos diagramas, como um momento de consolidação de acordo com a teoria da Aprendizagem Significativa (MOREIRA, 2010, 2011, MOREIRA; MASINI, 1982), propomos que os(as) licenciandos(as) se reúnam em grupos e negociem significados de forma que elaborem apenas um vê de Gowin e depois apresente para o restante da turma. Dessa forma sugerimos finalizar a UD1.

Nesse momento daremos início a descrição das atividades propostas para a Unidade Didática UD2. Sugerimos iniciar a Unidade Didática UD2 com uma apresentação prévia do conteúdo da unidade e dos seus objetivos. A seguir iniciaremos a unidade didática UD2 com uma Apresentação expositiva das formulações propostas para a Mecânica Quântica, enfatizando a proposta ondulatória. Essa atividade tem a função de *organizador prévio* (MOREIRA, 2011; MOREIRA; MASINI, 1982). Nessa apresentação é sugerido enfatizar a necessidade de uma formulação quântica, identificando as anomalias presentes nos modelos semi-clássicos e influência do trabalho de De Broglie para a formulação da Mecânica Ondulatória.

Após a apresentação expositiva, sugerimos que o(a) professor(a) implementador da abordagem promova uma discussão a respeito dos principais pontos, esclarecendo eventuais dúvidas.

Após a promoção do debate, sugerimos a leitura com problematização do fragmento da composição histórico-conceitual: A equação de onda de Schrödinger (texto correspondente as seções 6.1.7.1, 6.1.7.2, 6.1.7.3 e 6.3.7.4 da composição histórico-conceitual) As problematizações que consideramos relevante se destacam: as semelhanças e diferenças e as formulações ondulatórias de Schroedinger e De

Broglie, a tentativa de equação de onda relativística e a proposta da equação de onda não relativística, as correspondências entre Schrödinger e Sommerfeld e a interpretação da função de onda Ψ proposta Max Born e suas consequências.

De acordo com as análises dos resultados empíricos da questão 6 proposta aos licenciandos(as), identificamos uma noção alternativa a respeito da interpretação física da função de onda Ψ , em que consideram que a função em si representa a probabilidade de se encontrar em elétron em determinada região. Inferimos assim, considerando essa noção alternativa, uma falta de conhecimento ou aprendizagem significativa a respeito das propriedades da função de onda, como uma função complexa.

Dessa forma, consideramos de extrema importância para a formação de professores de Física enfatizarmos os aspectos conceituais e interpretacionais a respeito da equação de Schrödinger, a função de onda Ψ , bem como sua relação com os números quânticos.

Após a leitura e suas problematizações, sugerimos uma atividade exploratória utilizando um simulador disponível em aplicativo de celular pelo link <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vlvolad.hydrogenatom>> e pelo computador pelo link <<http://csi.chemie.tu-darmstadt.de/ak/immelmisc/oc-scripts/orbitals.html?id=1?orbital=2pz>> que fornece a representação da região de probabilidade de encontrar em elétron, tendo como parâmetro os números quânticos (exceto o número quântico de spin). Espera-se que os licenciandos identifiquem as relações entre a simetria das regiões de probabilidade e os números quânticos.

Com o conteúdo da apresentação expositiva, da leitura com problematização e a atividade exploratória utilizando o simulador, propomos que os(as) licenciandos (as) construam em duplas um vê de Gowin, discutindo e negociando significados. E como atividade de consolidação propomos uma dinâmica em que os(as) licenciandos (as) apresentam para o restante da turma o vê elaborado.

Após a atividade de consolidação, sugerimos propor aos licenciandos a realização de uma leitura com problematização dos fragmentos da composição histórico-conceitual: “O princípio de incerteza”; “A interpretação de complementaridade e “O modelo ondulatório do átomo” (que corresponde as seções 6.1.8, 6.1.9 e 6.1.10 da composição histórico-conceitual).

De acordo com os resultados empíricos obtidos pela questão 4, destacamos as discussões conceituais de interpretação da mecânica quântica e a questão do

determinismo e indeterminismo.

Ampliando as problematizações, sugerimos a promoção de um debate a respeito das principais diferenças conceituais entre os modelos atômicos semi-clássicos e o modelo ondulatório do átomo. Terminada a discussão sugerimos que os licenciandos realizem a leitura do capítulo 1- intitulado “No país do Quantum” (Anexo E) e do capítulo 3- intitulado “O Instituto de Mecânica” (Anexo F) do livro “Alice no país do quantum” de Robert Gilmore (1998).

Após os(as) licenciandos(as) realizarem as leituras, sugerimos a promoção de uma discussão a respeito dos fenômenos descritos nesses capítulos e suas relações com os números quânticos. Consideramos pertinente realizar discussões a respeito do spin do elétron e do Princípio de Incerteza. Sugerimos, guiados pelos resultados empíricos provenientes da questão 4 em específico ao registro alocado na URE 4.9, realizar discussões a respeito das profundas diferenças conceituais e propriedade físicas entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.

A seguir sugerimos que seja proposto aos licenciandos, que elaborem individualmente um Vê de Gowin a respeito do conceito de números quânticos envolvendo todas as discussões e informações fornecidas ao longo da abordagem. Como material de apoio sugerimos que eles tenham acesso as dez perguntas propostas por Novak e Gowin (1984) e aos diagramas construídos anteriormente.

Como atividade de consolidação final, sugerimos que cada licenciando (a) apresente o seu diagrama em Vê, explicando cada elemento que o constitui. Nesse momento consideramos pertinente que o (a) professor (a) implementador da abordagem faça intervenções para que os conceitos e elementos do Vê estejam o mais coerente possível e instigue discussões a respeito de pontos que julgar relevantes.

Após a consolidação final, será proposto que os (as) licenciandos (as) respondam ao questionário posterior a respeito do tema Números Quânticos ⁸⁷. Após o término da aplicação da abordagem sugerimos o encerramento da abordagem didática com enfoque histórico- conceitual.

⁸⁷ O questionário posterior contém as mesmas perguntas que o questionário prévio.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa investigação apresentamos uma discussão a respeito da importância da inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Destacamos que mesmo conhecendo a importância e os argumentos favoráveis a essa inserção, diversas pesquisas indicam que ela de fato não ocorre efetivamente. Dentre os motivos que dificultam essa inserção evidenciamos as limitações presentes na formação inicial de professores de Física.

Ao propor uma Abordagem com enfoque histórico-conceitual a respeito de um conteúdo de Mecânica Quântica buscamos articular as muitas contribuições da HFC no ensino de Ciências e na formação docente com um conteúdo específico, que consideramos relevante e pouco explorado conceitualmente na literatura. Dessa forma, consideramos que essa investigação pode contribuir para uma formação docente adequada (especialmente de professores de Física), e por consequência contribuir para o ensino de Ciências de maneira geral.

Chamamos atenção nessa investigação para o fato que, dentre dos saberes necessários para o exercício da prática docente está o conhecimento do conteúdo da disciplina a ser ensinada. De acordo com os autores Shulman (1986, 1987) e Gauthier *et. al.* (1998) esse conhecimento do conteúdo não deve ser apenas sintético, mas deve integrar também aspectos históricos e epistemológicos.

Tendo em vista essas questões desenvolvemos esse trabalho com o objetivo de investigar metodologicamente a construção de uma Abordagem Didática com enfoque histórico-conceitual a respeito do conceito de Números Quânticos que tenha a potencialidade de enriquecer a base conceitual desses licenciandos e por consequência contribua para sua formação docente. Para atender a esse objetivo, aplicamos um questionário a licenciandos de Física que já haviam cursado disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica, contendo questões a respeito de aspectos conceituais da Mecânica Quântica e do conceito de Números Quânticos, além de aspectos da Natureza do Conhecimento Científico

Assim, por meio dos questionários enviados aos licenciandos(as) foi possível identificar que mesmo tendo sido aprovados em disciplinas de Introdução a Mecânica Quântica, ainda apresentam algumas noções alternativas a respeito dos conceitos abordados. Consideramos que isso pode ser oriundo de práticas tradicionais de ensino baseadas na racionalidade técnica e no ensino transmissivo, que pode

proporcionar aos licenciandos(as) uma aprendizagem mecânica dos conceitos em detrimento a aprendizagem significativa almejada.

Foi possível identificar que os(as) licenciandos(as) investigados possuem noções alternativas de alguns conceitos relacionados aos Números Quânticos e a conceitos fundamentais da Física Quântica, além de apresentarem algumas noções inadequadas a respeito da Natureza do Conhecimento Científico.

Em relação a Natureza do Conhecimento Científico identificamos que os(as) licenciandos(as) investigados possuem visões rígidas a respeito da construção do conhecimento científico, e citam o “método científico” com um conjunto de regras a serem seguidas. Identificamos também noções empírico-induvidistas e verificacionistas. Além disso, não houve menção aos aspectos relacionados ao papel da criatividade na produção do conhecimento científico bem como seu aspecto colaborativo e coletivo.

Em relação ao conteúdo científico específico abordado, identificamos que os(as) licenciandos(as) investigados apresentaram noções alternativas a respeito do conceito de Números Quânticos, em que: associam os Números Quânticos apenas a quantização da energia e desconsideram a quantização espacial, de momento angular orbital e do momento angular intrínseco de elétron (spin); consideram os Números Quânticos entidades sem correspondência empírica e que surgem diretamente da equação de Schrödinger. Identificamos também que não houve menção a propriedade de discreteza dos Números Quânticos.

Ainda a respeito dos Números Quânticos, identificamos que os(as) licenciandos(as) investigados não consideram o spin como um dos Números Quânticos atômicos e o relacionam com conceitos clássicos, como o de rotação.

Em relação aos conceitos gerais da Mecânica Quântica, foi possível identificar noções alternativas a respeito da interpretação física da função de onda Ψ , em que os(as) licenciandos(as) indicaram não conhecer as propriedades dessa função. Identificamos também a noção alternativa de que a Mecânica Clássica é um caso particular da Mecânica Quântica o que sinaliza a importância de enfatizar as profundas diferenças conceituais entre essas teorias

Conhecendo esses resultados, elaboramos uma Abordagem Didática com enfoque histórico-conceitual de forma que ela abordasse e tivesse o potencial de esclarecer as dificuldades conceituais identificadas. Como recurso pedagógico proposto para a abordagem, elaboramos uma composição histórico-conceitual a

respeito da evolução histórica do conceito de Números Quânticos desde o átomo de Bohr até as primeiras formulações da Mecânica Quântica.

Consideramos que tanto a Abordagem Didática proposta tanto a composição histórico-conceitual, podem contribuir para a formação inicial de professores de Física, como auxílio e/ou subsídio para adaptação de abordagens com enfoque histórico-conceitual com a temática de Números Quânticos e Mecânica Quântica.

Por fim, relatamos a grande satisfação de desenvolver uma pesquisa que tenha o intuito de contribuir com investigações que apresentem resultados das potencialidades e limitações de uma Abordagem Didática histórico-conceitual para a formação de professores de Física. Destacamos que pretendemos dar continuidade a essa pesquisa realizando uma intervenção pedagógica para a efetiva aplicação da abordagem proposta.

REFERÊNCIAS

ARAMAN, Eliane Maria de Oliveira. **Contribuições da história da matemática para a construção dos saberes do professor de matemática**. 2011. 228f. Tese (Doutorado em Ciências e Educação Matemática). Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

ALMEIDA, Patrícia Cristina Albieri; BIAJONE, Jefferson. Saberes docentes e formação inicial de professores: implicações e desafios para as propostas de formação. **Educação e Pesquisa**, v. 33, n. 2, p. 281-295, 2007.

BATISTA, I. de L. O ensino de teorias físicas mediante uma estrutura histórico-filosófica. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 3, p. 461-476, 2004.

_____. Reconstruções Histórico-Filosóficas e a pesquisa em Educação Científica e Matemática. In: NARDI, R. (org.). **A pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil: alguns recortes**. 1. ed. São Paulo: Escrituras Editora, p. 257-272, 2007.

_____. Uma adoção da História e Filosofia da Ciência no desenvolvimento de saberes docentes interdisciplinares. In: BATISTA, Irinéa de Lourdes (Org.). **Conhecimentos e saberes na Educação em Ciências e Matemática**. Editora UEL, Londrina- Pr, p. 157- 167, 2016.

BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. Tradução: Luíz Antero Reto, Augusto Pinheiro- São Paulo: Edições 70, 2011.

BOGDAN, Robert C.; BIKLEN, Sari K. **Investigação qualitativa em educação**. Portugal: Porto Editora, 1994.

BRASIL, Ministério da Educação e Cultura – Secretaria de Educação Básica, **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN+)**, 2002.

BRASIL. Resolução CNE/CP 2/2019. Define as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação Inicial de Professores para a Educação Básica e institui a Base Nacional Comum para a Formação Inicial de Professores da Educação Básica (BNC-Formação). **Diário Oficial da União**, Brasília, 15 de abril de 2020, Seção 1, pp. 46-49.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de; GIL-PÉREZ, Daniel. **Formação de professores de ciências: tendências e inovações**. Cortez, 2011.

CAMPOS, Silmara; PESSOA, Valda Inês Fontenele. Discutindo a formação de professoras e de professores com Donald Schön. In: GERALDI, Corinta Maria Grisolia; FIORENTINI, Dario; PEREIRA, Elisabete Monteiro de A. (Org.). **Cartografias do trabalho docente: professor (a)-pesquisador (a)**. Campinas: Mercado de Letras/ALB. p.183- 206, 2003.

CIRINO, Marcelo Maia; DE SOUZA, Aguinaldo Robinson. O LIVRO-TEXTO DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO E A VISÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE

NÚMEROS QUÂNTICOS. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*, V, 2005. **Anais [...]** Associação Brasileira De Pesquisa Em Educação Em Ciências Atas Do V ENPEC - Nº 5. 2005 - ISSN 1809-5100.

COSTA, Marcia da. **Uma Abordagem Histórico-didática com Auxílio de Multimídias para o Ensino de Partículas Elementares no Ensino Médio**. 2015. 208f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

COFRÉ, Hernán et al. A critical review of students' and teachers' understandings of nature of science. **Science & Education**, v. 28, n. 3-5, p. 205-248, 2019.

DRUMMOND, Juliana M. Hidalgo F. et al. Narrativas históricas: gravidade, sistemas de mundo e natureza da ciência. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, p. 99-141, 2015.

FASCE, Angelo; PICÓ, Alfonso. Science as a Vaccine. **Science & Education**, v. 28, n. 1-2, p. 109-125, 2019.

FIORENTINI, Dario; SOUZA JUNIOR, Arlindo José de; MELO, Gilberto Francisco Alves de. Saberes docentes: um desafio para acadêmicos e práticos. *In: GERALDI, Corinta Maria Grisolia; FIORENTINI, Dario; PEREIRA, Elisabete Monteiro de A. (Org.). Cartografias do trabalho docente: professor (a)-pesquisador (a). Campinas: Mercado de Letras/ALB*, p. 307-335, 2003.

FORATO, de Mello; Thaís Cyrino; PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto Andrade. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais [online]**. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8.

FREIRE JR, Olival; NETO, Rodolfo Alves de Carvalho. O Universo dos Quanta: uma breve história da Física Moderna. **São Paulo: FTD**, 1997.

GAUTHIER, Clermont; MARTINEAU, Stéphane; DESBIENS, Jean-François; MALO, Annie; SIMARD, Denis. **Por uma teoria da pedagogia: pesquisas contemporâneas sobre o Saber Docente**. Ijuí: UNIJUÍ, 1998.

GIL-PÉREZ, D.; MONTORO I. F.; ALÍS J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma visão não deformada do pensamento científico. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 1-11, 2011.

GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antônio; HERSCOVITZ, Victoria E. Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 4, p. 444-457, 2001.

GRECA, Ileana Maria, FREIRE JR., Olival. **Ênfase conceitual e interpretações no ensino da Mecânica Quântica**. *In: FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and*

BROMBERG, JL., orgs. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais [online]**. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8.

HEERDT, Bettina; BATISTA, Irinéa de Lourdes. Questões de gênero e da natureza da ciência na formação docente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 30-51, 2016.

HIDALGO, Juliana Mesquita; SCHIVANI, Milton; DA SILVA MARTINS, Mykaell. História e Filosofia da Ciência na formação docente: trabalhando com animações digitais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 805-850, 2018.

KIKUCHI, Ligia Ayumi. **O ensino da física do plasma e a formação de professores** Londrina, 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

MOREIRA, Marco A.; MASINI, Buchweitz, B. EFS, **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

MOREIRA, Marco A., Aprendizagem Significativa: um conceito subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review** – V1(3), pp. 25-46, 2011.

NOVAK, J. D.; GOWIN, D. B. **Aprender a aprender**. em português. Lisboa: Plátano Edições Técnicas. 212p, 1984.

OLIVEIRA, Isolina; SERRAZINA, Lurdes. A reflexão e o professor como investigador. **Refletir e investigar sobre a prática profissional**, v. 29, p. 29-42, 2002.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, p. 447-454, 2007.

ORTIZ, Adriano José. **História da ciência e construção do conhecimento pedagógico do conteúdo relatividade na formação de professores de física**. 2014. 145f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

OSTERMANN, F; MOREIRA, M. A; Uma Revisão Bibliográfica Sobre a Área de Pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A; Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.18, n.2, p.135- 151, 2001.

OSTERMANN, Fernanda; RICCI, Trieste SF. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

PINTO, Alexandre Custódio; ZANETIC, João. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

PESSOA JR, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica 1**. Editora Livraria da Física, 2003.

RAMOS, Lucilene Correia; DA SILVA, Juliel Cerqueira; SILVA, José Luis de Paula Barros. Modelo atômico quântico em coleções de química aprovadas no PNLD 2015. Parte I: quantum de energia, dualidade onda-partícula e números quânticos. *In*: – X ENPEC Águas de Lindóia, SP –24 a 27 de novembro de 2015. **Anais [...]** Associação Brasileira De Pesquisa Em Educação Em Ciências Atas Do X ENPEC – 2015.

JOHANSSON, Anders et al. “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, v. 13, n. 1, p. 205-226, 2018.

JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, v. 20, n. 4, p. 427-446, 1998.

LEDERMAN, Norman G. Contextualizing the relationship between nature of scientific knowledge and scientific inquiry. **Science & Education**, v. 28, n. 3-5, p. 249-267, 2019.

MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira. História da ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, Roberto de Andrade. Como não escrever sobre história da física—um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, p. 113-129, 2001.

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

MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há Muitas Pedras nesse Caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v. 24, n.1, p.112 -131, 2007.

MONTEIRO, Midiã M.; MARTINS, André Ferrer P. História da ciência na sala de aula: Uma sequência didática sobre o conceito de inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4501-1-4501-9, 2015.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164- 214, dez. 1995.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio. **Ciência & Educação**. v. 15, n.3, p. 557-580, 2009.

MOTA, Luzia Matos. **As Controvérsias Sobre a Interpretação da Mecânica Quântica e a Formação dos Licenciados em Física: Um estudo em duas**

instituições: UFBA e UFSC. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

NETTO, Jader da Silva; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio Jose de Holanda. Fenômenos intermediários de interferência e emaranhamento quânticos: o interferômetro virtual de Mach-Zehnder integrado a atividades didáticas. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 35, n. 1 (abr. 2018), p. 185-234, 2018.**

SHULMAN, Lee S. Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. **Harvard educational review**, v. 57, n. 1, p. 1-23, 1987.

_____. Those who understand: Knowledge growth in teaching. **Journal of Education**, v. 193, n. 3, p. 1-11, (1986) 2013.

_____. PCK: Its genesis and exodus. In: BERRY, A; FRIEDRICHSEN, P; LOUGHRAN, J (Ed.). **Re-examining pedagogical content knowledge in science education**. Routledge, p. 3- 13, 2015.

SCHÖN, Donald. Formar professores como profissionais reflexivos. In: NÓVOA, Antônio (Coord.). **Os Professores e a sua Formação**. 3ª ed. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1997.

SILVA, André Coelho da; ALMEIDA, Maria José Pereira Monteiro. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 624-652, 2011.

SILVA, Boniek Venceslau da Cruz; MARTINS, André Ferrer P. Uma proposta para avaliação do desenvolvimento do conhecimento pedagógico do conteúdo de futuros professores de Física acerca da temática Natureza da Ciência. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, p. 389-413, 2018.

TEIXEIRA, Elder Sales; EL-HANI, Charbel Niño; FREIRE JR, Olival. Concepções de estudantes de física sobre a natureza da ciência e sua transformação por uma abordagem contextual do ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 1, n. 3, 2001.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I. M.; FREIRE JR, O. Uma revisão sistemática das pesquisas publicadas no Brasil sobre o uso didático de História e Filosofia da Ciência no ensino de Física. In: Peduzzi, L. O. Q.; Martins, A. F. P.; Ferreira, J. M. H. (Orgs.) **Temas de História e Filosofia da Ciência no ensino**. EDUFERN, 372f, 2012.

TERRAZZAN, E. A inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209- 214, 1992.

SANTANA, Fábio Bartolomeu; SANTOS, Paulo José Sena. Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 555-589, 2017.

SILVA, Eider de Souza; TEIXEIRA, Elder Sales; PENIDO, Maria Cristina Martins. Análise de propostas didáticas de física orientadas por abordagens

históricas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 766-804, 2018.

VALADARES, Juarez Melgaço. O professor diante do espelho: reflexões sobre o conceito de professore reflexivo. In: PIMENTA, Selma Garrido; GHEDIN, Evandro (Org.). **Professor reflexivo no Brasil: gênese e crítica de um conceito**. São Paulo: Cortez, p. 187-200, 2008.

VASCONCELOS, Stephanie Siqueira; DE MELLO FORATO, Thaís Cyrino. Niels Bohr, espectroscopia e alguns modelos atômicos no começo do século XX: um episódio histórico para a formação de professores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 851-887, 2018.

MEHRA, J. **Golden Age Of Theoretical Physics, The (Boxed Set Of 2 Vols)**. Singapore: World Scientific, 2001. ISBN 9789810243425.

Massimi, M. **What Demonstrative Induction Can Do Against the Threat of Underdetermination: Bohr, Heisenberg, and Pauli on Spectroscopic Anomalies (1921–24)**. *Synthese*, 140(3), 243–277, 2004.

MARTINS, R. A. **De Louis De Broglie a Schrödinger: uma comparação**. In: FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais [online]**. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks: Físicos modernos e suas descobertas**. Trad. de FERREIRA, W. H. Brasília: Universidade de Brasília, 345f, Coleção pensamento científico, 24, 1987.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Questionário enviado aos licenciandos(as) por meio do Formulários Google

27/07/2020

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

Esse questionário faz parte da coleta de informações da pesquisa de mestrado intitulada "UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O ENSINO DE INTRODUÇÃO DE FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA" realizada na Universidade Estadual de Londrina (UEL).

***Obrigatório**

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

27/07/2020

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

1. Prezado (a) Senhor(a): Gostaríamos de convidá-lo(a) para participar da pesquisa "UMA ABORDAGEM HISTÓRICO-CONCEITUAL PARA O ENSINO DE INTRODUÇÃO A FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA", que faz parte do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática (PECEM), orientada pela Prof^a Dr^a Irinéa de Loudes Batista, a ser realizada na Universidade Estadual de Londrina (UEL). O objetivo da pesquisa é investigar metodologicamente a construção de uma Unidade Didática com enfoque Histórico-Conceitual a respeito de Física Quântica. Sua participação é muito importante e ela se daria por meio de um questionário. Esclarecemos que sua participação é totalmente voluntária, podendo o(a) senhor(a) recusar-se a participar ou mesmo desistir a qualquer momento, sem que isto acarrete qualquer ônus ou prejuízo a sua pessoa. Esclarecemos também que as informações serão utilizadas somente para os fins desta e de futuras pesquisas e serão tratadas como o mais absoluto SIGILO e CONFIDENCIABILIDADE, de modo a preservar sua identidade. Os benefícios esperados são contribuir com a Formação Inicial de Professores de Física, fornecendo conseqüentemente, uma contribuição para o ensino de Física na Educação Básica. Caso tenha qualquer dúvida a respeito da pesquisa ou necessite de maiores esclarecimentos poderá nos contatar: FRANCELINE CARDOSO; Endereço: Rua do Ipiranga, 357 casa B, Jardim Morumbi, CEP 86191-765, Cambé, PR; Celular (WhatsApp): (43) 99970-2346; E-mail: franceline29cardoso@gmail.com *

Marcar apenas uma oval.

- Declaro que fui devidamente esclarecido e concordo em participar VOLUNTARIAMENTE da pesquisa.
- Não aceito participar

Informações
do
Participante

(As informações serão utilizadas somente para os fins desta, e serão tratadas com o mais absoluto sigilo e confidencialidade, de modo a preservar a sua identidade)

2. Nome completo: *

27/07/2020

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

3. Em seu curso de graduação, você já cursou as disciplinas de Física Moderna I A e Física Moderna I B? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não
 Estou cursando

4. Informe a Habilitação de seu curso *

Marcar apenas uma oval.

- Licenciatura
 Bacharelado
 Concomitante

Questionário:

Esse questionário não possui caráter avaliativo. Para que seu objetivo seja efetivamente alcançado, gostaríamos de pedir que não fosse consultado qualquer material durante as respostas.

5. 1- Durante seu curso de formação relacionado a introdução da Mecânica Quântica, que enfoques didáticos foram utilizadas para o ensino de Introdução de Física Quântica? (Caso já tenha cursado). *

27/07/2020

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

6. 2- Em sua opinião, o que é Ciência? *

7. 3- Em sua opinião, o desenvolvimento do conhecimento científico requer experimentos? Justifique sua resposta. *

8. 4- No contexto da disciplina de Física, que aspectos teóricos e propriedades físicas diferenciam a Mecânica Clássica da Mecânica Quântica? *

9. 5- No contexto da disciplina de Física, o que você entende pelo conceito de Números Quânticos do átomo de hidrogênio? *

27/07/2020

Questionário: "Uma abordagem Histórico-Conceitual para o Ensino de Física Quântica"

10. 6- No contexto da disciplina de Física, como você descreveria a interpretação física da função de onda proposta por Schrödinger? *

11. 7- No contexto da disciplina de Física, como você descreveria o conceito de spin do elétron? *

12. 8- O que você conhece a respeito dos espectros atômicos? *

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

ANEXOS

ANEXO A

Matriz curricular do curso de licenciatura Física- UEL (2010)



2010

FÍSICA

HABILITAÇÃO: LICENCIATURA

TURNO: NOTURNO

DURAÇÃO: MÉDIA 4,5 ANOS - MÁXIMA 9 ANOS

SISTEMA ACADÊMICO: CRÉDITO ANUAL

		Carga Horária						
Código	Nome	Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
1º ANO								
2FIS062	LABORATÓRIO DE FÍSICA GERAL I	A	0	90	0	90		
2FIS063	SEMINÁRIOS I	A	15	0	0	15		
2MAT032	CÁLCULO E GEOMETRIA ANALÍTICA I	A	150	0	0	150		
2QUI069	QUÍMICA	A	60	60	0	120		
2FIS018	FÍSICA BÁSICA	1S	60	30	0	90		
2FIS016	ESTRUTURA DA MATÉRIA	2S	60	0	0	60		
2FIS019	FÍSICA GERAL I	2S	75	15	0	90		
	Total		420	195	0	615		
2º ANO								
		Carga Horária						
Código	Nome	Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
2FIS023	FÍSICA GERAL III	A	90	30	0	120	2FIS019 e	2MAT032
2FIS042	PRÁTICA VIVENCIADA I	A	0	60	0	60		
2FIS064	LABORATÓRIO DE FÍSICA GERAL II	A	0	120	0	120	2FIS062	
2FIS065	SEMINÁRIOS II	A	15	0	0	15	2FIS063	
2MAT033	CÁLCULO E GEOMETRIA ANALÍTICA II	A	150	0	0	150	2MAT032	
2FIS021	FÍSICA GERAL II	1S	75	15	0	90	2FIS019	
2FIS024	FÍSICA MATEMÁTICA I	2S	60	0	0	60	2MAT032	
	Total		390	225	0	615		
3º ANO								
		Carga Horária						
Código	Nome	Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
2EST306	INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA: ESTÁGIO SUPERVISIONADO (FIS)	A	0	180	0	180	2FIS023	
2FIS027	LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA	A	0	120	0	120	2FIS022	2FIS050
2FIS068	MECÂNICA GERAL	A	90	30	0	120	2FIS019 e	2MAT032
2FIS070	FÍSICA MODERNA I A	1S	90	0	0	90	2FIS021 e	2FIS023
2FIS043	PRÁTICA VIVENCIADA II	2S	0	30	0	30		
2FIS071	FÍSICA MODERNA I B	2S	60	0	0	60	2FIS021 e	2FIS023
	Total		240	360	0	600		
4º ANO								
		Carga Horária						
Código	Nome	Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
2EST309	DIDÁTICA NO ENSINO DE CIÊNCIAS FÍSICAS: ESTÁGIO SUPERVISIONADO (FIS)	A	30	30	0	60	2FIS050	
2FIS031	ELETROMAGNETISMO I	A	90	0	0	90	2FIS023 e	2MAT033
2EDU009	PSICOLOGIA DA EDUCAÇÃO A	1S	45	15	0	60		
2EST318	METODOLOGIA E PRÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA I: ESTÁGIO SUPERVISIONADO (FIS)	1S	60	30	0	90	2EST306	
2FIS044	PRÁTICA VIVENCIADA III	1S	0	30	0	30		
2FIS045	FÍSICA MODERNA II	1S	60	0	0	60	2FIS050	
2EDU015	LIBRAS - LÍNGUA BRASILEIRA DE SINAIS	2S	30	30	0	60		
2EST319	METODOLOGIA E PRÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA II: ESTÁGIO SUPERVISIONADO (FIS)	2S	0	90	0	90	2EST306	2EST318
2FIS048	EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS E TEORIAS DA FÍSICA	2S	60	0	0	60	2FIS050	
	Total		375	225	0	600		

		5º ANO						
Código	Nome	Oferta	Carga Horária			Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.			
2COP005	INTRODUÇÃO À LINGUAGEM DE COMPUTAÇÃO	1S	30	30	0	60		
2FIS046	INTRODUÇÃO ÀS TÉCNICAS DE ENSINO E PESQUISA EM FÍSICA	1S	30	30	0	60	2FIS028 e 2FIS050	
2FIS047	TERMODINÂMICA	1S	60	0	0	60	2FIS021 e 2MAT033	
2FIS069	FÍSICA MODERNA III	1S	60	0	0	60	2FIS045	
	DISCIPLINA OPTATIVA	1S	60	0	0	60		
	Total		240	60	0	300		

DISCIPLINAS OPTATIVAS

Código	Nome	Cred	Carga Horária			Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.			
2EDU903	LÍNGUA BRASILEIRA DE SINAIS - LIBRAS	0	30	30	0	60		
2FIS905	INTRODUÇÃO À FÍSICA DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES	0	60	0	0	60		
2FIS906	FÍSICA CÔSMICA: COSMOLOGIA E RAIOS CÔSMICOS	0	60	0	0	60		
2FIS907	INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA	0	45	15	0	60		

OBSERVAÇÕES:

a) Além das atividades pedagógicas constantes da seriação deverão ser cumpridas:

- 60 horas de Disciplinas Optativas;

- 30 horas de Seminários Programados;

- 110 horas das demais Atividades Acadêmico-Científico Culturais (Monitoria Acadêmica, Projetos de Pesquisa em Ensino, de Pesquisa, de Extensão e Integrados, Programas de Extensão e de Formação complementar no ensino de graduação, Disciplinas Especiais, Cursos de Extensão, Eventos, Estágios curriculares não obrigatórios, Disciplinas Eletivas e Disciplinas Optativas cursadas além do mínimo estabelecido), resultando em uma carga horária total para o curso de 2.840 horas.

b) Para os estudantes que integralizarem a 1ª e 2ª séries, será permitido cursar disciplinas da outra Habilitação, no limite de 240h, desde que haja vagas disponíveis.

c) As disciplinas 2FIS039 INTRODUÇÃO À FÍSICA NUCLEAR, 2FIS038 INTRODUÇÃO À FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO e 2FIS035 MECÂNICA QUÂNTICA I da Habilitação Bacharelado, poderão ser cursadas como optativas.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO, PROMOÇÃO E RETENÇÃO

Sistema de Avaliação

Considerar-se-á aprovado na atividade acadêmica, o estudante que obtiver média final igual ou superior a 6,0 (seis) e frequência de, no mínimo, 75% (setenta e cinco por cento).

Não haverá exame final.

A atividade acadêmica de natureza obrigatória especial, Estágio Supervisionado, deve atender aos objetivos do Projeto Pedagógico e terá sistema de avaliação e controle de frequência definidos em regulamentos próprios, aprovados pela Câmara de Graduação.

Crítérios de Promoção

O sistema de progressão será anual e por atividade acadêmica, dependendo do cumprimento dos pré-requisitos constantes do currículo.

O estudante poderá solicitar matrícula em disciplinas ofertadas em turno diverso ao de sua matrícula desde que haja disponibilidade de vagas e o cumprimento do pré-requisito, quando for o caso.


O estudante poderá cursar, no máximo, 2 (duas) disciplinas de sua habilitação fora do seu turno de matrícula, respeitando-se o número de vagas disponíveis.

Para os estudantes que integralizarem a 1ª e 2ª séries será permitido cursar disciplinas da outra habilitação no limite de 240 (duzentos e quarenta) horas, desde que haja vagas disponíveis.

Informações Adicionais

ANEXO B

Definição de função de onda disponível no site Wikipédia



WIKIPÉDIA
A enciclopédia livre

Artigo [Discussão](#)

Ler [Editar](#) [Ver histórico](#)

Função de onda [ocultar]

Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre.

? Este artigo ou secção contém uma lista de referências no fim do texto, mas as suas fontes não são claras porque **não são citadas no corpo do artigo**, o que **compromete a confiabilidade** das informações. Ajude a melhorar este artigo inserindo citações no corpo do artigo. *(Junho de 2011)*

Mecânica quântica

$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$

Princípio da incerteza

Introdução a ...

Formulação matemática

Introdução [\[Expandir\]](#)

Conceitos fundamentais [\[Expandir\]](#)

Estado quântico [Função de onda](#)

Superposição [Emaranhamento](#)

Interferência

Efeito do observador

Exclusão [Dualidade](#)

Decoerência [Teorema de Ehrenfest](#)

Tunelamento

Experiências [\[Expandir\]](#)

Representações [\[Expandir\]](#)

Equações [\[Expandir\]](#)

Interpretações [\[Expandir\]](#)

Tópicos avançados [\[Expandir\]](#)

Cientistas [\[Expandir\]](#)

Esta caixa: [ver](#) [discutir](#) [editar](#)

Uma **função de onda** na **mecânica quântica** é algo que descreve o **estado quântico** de um sistema de uma ou mais partículas, e contém todas as informações sobre o sistema considerado isolado. Quantidades associadas com os cálculos, tais como o momento médio de uma partícula, são derivados a partir da função de onda por meio de operações matemáticas que descrevem a sua interação com os dispositivos de observação. Assim, a função de onda é uma entidade central na mecânica quântica. Os símbolos mais comuns para uma função de onda são as letras gregas ψ ou Ψ . A equação de Schrödinger determina como a função de onda evolui ao longo do tempo, ou seja, a função de onda é a solução da equação de Schrödinger. A função de onda se comporta qualitativamente como outras ondas, como ondas de água ou ondas em uma corda, porque a equação de Schrödinger é matematicamente um tipo de equação de onda. Isso explica o nome "função de onda", e dá origem a **dualidade onda-partícula**. A onda da função de onda, no entanto, não é uma onda no espaço físico, é uma onda em um "espaço" matemático abstrato, que pode ser representado como "espaço de configuração", ou pode ser representado como "espaço de momentum", e, por isso se difere fundamentalmente de ondas de água ou ondas em uma corda.^{[1][2][3][4][5][6][7]}

Uma **função de onda** para um determinado sistema não tem uma representação única. Mais comumente, é tomada como sendo uma função de todas as coordenadas de posição das partículas e do tempo, ou seja, a função de onda está na "posição espacial". No entanto, também pode considerar em vez uma função de onda no "espaço de momento", uma função de todos os momentos das partículas e do tempo. Em geral, a função de onda de um sistema é uma função de variáveis contínuas e descontínuas que caracteriza o grau de liberdade do sistema, e há *uma* função de onda para todo o sistema, e não uma função de onda para cada partícula individual em certo sistema. Partículas elementares, como os elétrons, têm spin, e a função de onda deve incluir essa propriedade fundamental como um grau de liberdade intrínseca. A função de onda é *espinorial* para os férmions, ou seja, para partículas com spin semi-inteiro (1/2, 3/2, 5/2, ...), ou *tensorial* para os bósons, que são partículas com spin inteiro (0, 1, 2, 3, ...).

Na maioria dos tratamentos da mecânica quântica, a função de onda é um valor complexo. Em uma interpretação importante da mecânica quântica chamada a interpretação de Copenhague, o módulo de elasticidade ao quadrado da função de onda, $|\psi|^2$, é um número real se interpretado como a **densidade da probabilidade** de encontrar uma partícula em um dado local num determinado momento, se a posição da partícula está a ser medida. Uma vez que a função de onda é um valor complexo, apenas a sua fase relativa e a sua relativa magnitude podem ser medidas. Isso não diz nada diretamente sobre as magnitudes ou as direções das observações mensuráveis, tem de se aplicar **operadores quânticos** para a função de onda ψ e encontrar os seus próprios valores, que correspondem a conjuntos de possíveis resultados de medição.

No entanto, os números complexos não são necessariamente usados em todos os cálculos. Louis de Broglie em seus últimos anos propôs uma função de onda de valor real ligada a uma função de onda complexa por uma constante de proporcionalidade e desenvolveu a teoria de Broglie-Bohm.

Índice [\[esconder\]](#)

1 Problemas de nomenclatura

ANEXO C

Matriz curricular curso de Bacharelado em Física- UEL (2010)



2010

FÍSICA

HABILITAÇÃO: BACHARELADO

TURNO: INTEGRAL

DURAÇÃO: MÉDIA 4 ANOS - MÁXIMA 8 ANOS

SISTEMA ACADÊMICO: CRÉDITO ANUAL

1º ANO

Código	Nome	Carga Horária				Pré-Requisito	Co-Requisito
		Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát. Total		
2FIS062	LABORATÓRIO DE FÍSICA GERAL I	A	0	90	0	90	
2FIS063	SEMINÁRIOS I	A	15	0	0	15	
2MAT032	CÁLCULO E GEOMETRIA ANALÍTICA I	A	150	0	0	150	
2QUI069	QUÍMICA	A	60	60	0	120	
2FIS018	FÍSICA BÁSICA	1S	60	30	0	90	
2FIS016	ESTRUTURA DA MATÉRIA	2S	60	0	0	60	
2FIS019	FÍSICA GERAL I	2S	75	15	0	90	
Total			420	195	0	615	

2º ANO

Código	Nome	Carga Horária				Pré-Requisito	Co-Requisito
		Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát. Total		
2FIS023	FÍSICA GERAL III	A	90	30	0	120	2FIS019 e 2MAT032
2FIS064	LABORATÓRIO DE FÍSICA GERAL II	A	0	120	0	120	2FIS062
2FIS065	SEMINÁRIOS II	A	15	0	0	15	2FIS063
2MAT033	CÁLCULO E GEOMETRIA ANALÍTICA II	A	150	0	0	150	2MAT032
2COP004	INTRODUÇÃO À LINGUAGEM DE COMPUTAÇÃO	1S	30	30	0	60	
2FIS021	FÍSICA GERAL II	1S	75	15	0	90	2FIS019
2FIS024	FÍSICA MATEMÁTICA I	2S	60	0	0	60	2MAT032
2MAT034	ÁLGEBRA LINEAR B	2S	60	0	0	60	
Total			480	195	0	675	

3º ANO

Código	Nome	Carga Horária				Pré-Requisito	Co-Requisito
		Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát. Total		
2FIS027	LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA	A	0	120	0	120	2FIS022 e 2FIS050
2FIS029	FÍSICA MATEMÁTICA II	1S	60	0	0	60	2FIS024 e 2MAT033
2FIS066	MECÂNICA GERAL A	1S	90	0	0	90	2FIS019 e 2MAT032
2FIS067	ELETROMAGNETISMO I	1S	60	30	0	90	2FIS023 e 2MAT033
2FIS070	FÍSICA MODERNA I A	1S	90	0	0	90	2FIS021 e 2FIS023
2FIS030	MECÂNICA ANALÍTICA	2S	90	0	0	90	2MAT033 e 2FIS028
2FIS032	ELETROMAGNETISMO II	2S	60	0	0	60	2FIS023 e 2FIS051
2FIS033	TERMODINÂMICA	2S	60	0	0	60	2MAT033 e 2FIS021 e 2MAT033
2FIS071	FÍSICA MODERNA I B	2S	60	0	0	60	2FIS021 e 2FIS023
Total			570	150	0	720	

		4º ANO						
Código	Nome	Carga Horária					Pré-Requisito	Co-Requisito
		Oferta	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total		
2FIS040	INTRODUÇÃO ÀS TÉCNICAS DE ENSINO E PESQUISA EM FÍSICA	A	30	30	0	60	2FIS028 e 2FIS050	
2TCC304	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (FIS)	A	90	90	0	180		
2FIS034	RELATIVIDADE RESTRITA	1S	60	0	0	60	2FIS028 e 2FIS050	
2FIS035	MECÂNICA QUÂNTICA I	1S	60	0	0	60	2FIS030 e 2FIS050	
2FIS039	INTRODUÇÃO À FÍSICA NUCLEAR	1S	60	0	0	60	2FIS050	
2FIS041	MECÂNICA ESTATÍSTICA	1S	60	0	0	60	2FIS028 e 2FIS033	
2FIS036	MECÂNICA QUÂNTICA II	2S	60	0	0	60	2FIS030 e 2FIS050	2FIS035
2FIS037	EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS E TEORIAS DA FÍSICA	2S	60	0	0	60	2FIS050	
2FIS038	INTRODUÇÃO À FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO	2S	60	0	0	60	2FIS026	
	DISCIPLINA OPTATIVA	2S	60	0	0	60		
	Total		600	120	0	720		

DISCIPLINAS OPTATIVAS

Código	Nome	Carga Horária					Pré-Requisito	Co-Requisito
		Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	Total		
2FIS900	FÍSICA NUCLEAR	0	60	0		60		
2FIS901	FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO	0	60	0		60		
2FIS902	LABORATÓRIO AVANÇADO	0	45	15	0	60		
2FIS903	CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO VÁCUO	0	30	30	0	60		
2FIS904	ÓPTICA	0	75	15	0	90		
2FIS905	INTRODUÇÃO À FÍSICA DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES	0	60	0	0	60		
2FIS906	FÍSICA CÔSMICA: COSMOLOGIA E RAIOS CÔSMICOS	0	60	0		60		
2FIS907	INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA	0	45	15	0	60		
2FIS908	RELATIVIDADE GERAL	0	60	0	0	60		
2FIS909	INTRODUÇÃO AO CAOS	0	60	0	0	60		
2FIS910	TÓPICOS ESPECIAIS EM GEOMETRIA, TOPOLOGIA E FÍSICA	0	60	0	0	60		

OBSERVAÇÕES:

a) Além das atividades pedagógicas constantes da seriação deverão ser cumpridas:

- 60 horas de Disciplinas Optativas;

- 30 horas de Seminários Programados;

- 170 horas das demais Atividades Acadêmico-Científico Culturais (Monitoria Acadêmica, Projetos de Pesquisa em Ensino, de Pesquisa, de Extensão e Integrados, Programas de Extensão e de Formação complementar no ensino de graduação, Disciplinas Especiais, Cursos de Extensão, Eventos, Estágios curriculares não obrigatórios, Disciplinas Eletivas e Disciplinas Optativas cursadas além do mínimo estabelecido), resultando em uma carga horária total para o curso de 2900 horas.

b) Para cumprir a Atividade Acadêmica Especial de Natureza Obrigatória 2TCC304 - Trabalho de Conclusão de Curso, o estudante deverá ter integralizado as disciplinas até a 3ª série.

c) Para os estudantes que integralizarem a 1ª e 2ª séries, será permitido cursar disciplinas da outra Habilitação, no limite de 240h, desde que haja vagas disponíveis.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO, PROMOÇÃO E RETENÇÃO

Sistema de Avaliação

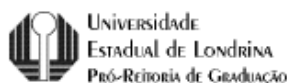
Considerar-se-á aprovado na atividade acadêmica, o estudante que obtiver média final igual ou superior a 6,0 (seis) e frequência de, no mínimo, 75% (setenta e cinco por cento).

Não haverá exame final.

A Atividade Acadêmica de Natureza Obrigatória Especial 2TCC304 - Trabalho de Conclusão de Curso, deverá atender aos objetivos do Projeto Pedagógico e terá sistema de avaliação e controle de frequência definidos em regulamentos próprios, aprovados pela Câmara de Graduação.

ANEXO D

Matriz curricular curso de Licenciatura UEL- 2019



2019

FÍSICA

HABILITAÇÃO: LICENCIATURA

TURNO: NOTURNO

DURAÇÃO: MÉDIA 9 SEMESTRES - MÁXIMA 18 SEMESTRES

SISTEMA ACADÊMICO: CRÉDITO SEMESTRAL

1º SEMESTRE

Código	Nome	Cred	Carga Horária				PCC	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC				
1EDU014	LIBRAS - LÍNGUA BRASILEIRA DE SINAIS	0	60	0	0	0	0	60		
1FIS096	INTRODUÇÃO À FÍSICA E AO LABORATÓRIO DE FÍSICA	0	60	30	0	0	0	90		
1FIS097	INICIAÇÃO À DOCÊNCIA I	0	0	0	0	0	60	60		
1FIS098	SEMINÁRIOS I	0	0	0	15	0	0	15		
1LET096	PRODUÇÃO DE TEXTOS	0	60	0	0	0	0	60		
1MAT095	PRÉ CÁLCULO	0	60	0	0	0	0	60		
	Total		240	30	15	0	60	345		

2º SEMESTRE

Código	Nome	Cred	Carga Horária				PCC	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC				
1FIS099	FÍSICA GERAL I	0	90	0	0	0	0	90		
1FIS100	LABORATÓRIO DE FÍSICA I	0	0	60	0	0	0	60	1FIS096	
1FIS101	INICIAÇÃO À DOCÊNCIA II	0	0	0	0	0	75	75		
1FIS102	SEMINÁRIOS II	0	0	0	15	0	0	15		
1MAT096	CÁLCULO I	0	90	0	0	0	0	90		
	Total		180	60	15	0	75	330		

3º SEMESTRE

Código	Nome	Cred	Carga Horária				PCC	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC				
1FIS103	FÍSICA GERAL II	0	90	0	0	0	0	90		
1FIS104	LABORATÓRIO DE FÍSICA II	0	0	60	0	0	0	60	1FIS100	
1FIS105	INICIAÇÃO À DOCÊNCIA III	0	0	0	0	0	90	90	1FIS101	
1FIS106	SEMINÁRIOS III	0	0	0	15	0	0	15		
1MAT097	CÁLCULO II	0	60	0	0	0	0	60	1MAT096	
1MAT098	ÁLGEBRA LINEAR	0	60	0	0	0	0	60		
	Total		210	60	15	0	90	375		

4º SEMESTRE

Código	Nome	Cred	Carga Horária				PCC	Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
			Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC				
1EDU015	PSICOLOGIA DA EDUCAÇÃO	0	60	0	0	0	0	60		
1FIS107	FÍSICA GERAL III	0	90	0	0	0	0	90	1MAT096	
1FIS109	LABORATÓRIO DE FÍSICA III	0	0	60	0	0	0	60	1FIS104	
1FIS112	INICIAÇÃO À DOCÊNCIA IV	0	0	0	0	0	90	90		
1FIS113	SEMINÁRIOS IV	0	0	0	15	0	0	15		
1MAT099	CÁLCULO III	0	60	0	0	0	0	60	1MAT097	
	Total		210	60	15	0	90	375		

FÍSICA

HABILITAÇÃO: LICENCIATURA

TURNO: NOTURNO

		5º SEMESTRE						Pré-	Co-
		Carga Horária						Requisito	Requisito
Código	Nome	Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC	PCC	Total	
1EDU016	POLÍTICAS EDUCACIONAIS	0	60	0	0	0	0	60	
1EST330	ESTÁGIO SUPERVISIONADO I: DIDÁTICA E O ENSINO DE FÍSICA NA EDUCAÇÃO BÁSICA (FIS) (FIS)	0	0	75	0	0	0	75	1FIS112
1FIS114	FÍSICA GERAL IV	0	60	0	0	0	0	60	1FIS103 e 1FIS107 1FIS109
1FIS115	LABORATÓRIO DE FÍSICA IV	0	0	60	0	0	0	60	
1FIS118	INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA I	0	45	0	0	0	15	60	1FIS099 1FIS114
1MAT100	CÁLCULO IV	0	60	0	0	0	0	60	1MAT097
	Total		225	135	0	0	15	375	

		6º SEMESTRE						Pré-	Co-
		Carga Horária						Requisito	Requisito
Código	Nome	Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC	PCC	Total	
1EST331	ESTÁGIO SUPERVISIONADO II: METODOLOGIA E PRÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA (FIS) (FIS)	0	0	90	0	0	0	90	1EST330
1FIS119	TERMODINÂMICA E INTRODUÇÃO À MECÂNICA ESTATÍSTICA	0	90	0	0	0	0	90	1FIS114 e 1MAT099
1FIS125	FÍSICA MATEMÁTICA	0	60	0	0	0	0	60	1MAT099 e 1MAT100 1FIS118
1FIS128	INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA II	0	45	0	0	0	15	60	
	Total		195	90	0	0	15	300	

		7º SEMESTRE						Pré-	Co-
		Carga Horária						Requisito	Requisito
Código	Nome	Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC	PCC	Total	
1EST332	ESTÁGIO SUPERVISIONADO III: METODOLOGIA E PRÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA (FIS) (FIS)	0	0	90	0	0	0	90	1EST331
1FIS129	ELETROMAGNETISMO	0	90	0	0	0	0	90	1FIS119
1FIS130	MECÂNICA GERAL I	0	60	0	0	0	0	60	1FIS119
1FIS131	FÍSICA MODERNA I	0	90	0	0	0	0	90	1FIS119
1FIS132	EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS E TEORIAS DA FÍSICA	0	45	0	0	0	15	60	1FIS131
	Total		285	90	0	0	15	390	

		8º SEMESTRE						Pré-	Co-
		Carga Horária						Requisito	Requisito
Código	Nome	Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC	PCC	Total	
1EST333	ESTÁGIO SUPERVISIONADO IV: ABORDAGENS HISTÓRICO-FILOSÓFICAS NO ENSINO MÉDIO (FIS) (FIS)	0	0	60	0	0	0	60	1EST332 1FIS137
1FIS134	MECÂNICA GERAL II	0	60	0	0	0	0	60	1FIS130
1FIS135	FÍSICA MODERNA II	0	60	0	0	0	0	60	1FIS131
1FIS136	LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA I	0	0	60	0	0	0	60	1FIS131
1FIS137	ABORDAGENS HISTÓRICO-FILOSÓFICAS NO ENSINO MÉDIO	0	15	0	0	0	15	30	1FIS132
1QUI147	QUÍMICA I	0	30	30	0	0	0	60	
	Total		165	150	0	0	15	330	

FÍSICA

HABILITAÇÃO: LICENCIATURA

TURNO: NOTURNO

Código	Nome	9º SEMESTRE						Total	Pré-Requisito	Co-Requisito
		Cred	Teór.	Prát.	T/Prát.	TIC	PCC			
1EST334	ESTÁGIO SUPERVISIONADO V: METODOLOGIA E PRÁTICA DO ENSINO DE FÍSICA (FIS) (FIS)	0	0	90	0	0	0	90	1EST332	
1FIS138	FÍSICA MODERNA III	0	90	0	0	0	0	90	1FIS135	
1FIS139	LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA II	0	0	60	0	0	0	60	1FIS136	
1FIS140	INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA	0	30	0	0	0	30	60		
1QUI148	QUÍMICA II	0	30	30	0	0	0	60	1QUI147	
	Total		150	180	0	0	30	360		

OBSERVAÇÕES:

a) O estudante do curso de Física - Licenciatura deverá cumprir 210 (duzentas e dez) horas em Atividades Acadêmicas Complementares distribuídas em:

- 60 (sessenta) horas em seminários I, II, III e IV;

- 150 (cento e cinquenta) horas dentre as modalidades: Monitoria Acadêmica, Projetos de Pesquisa em Ensino, de Pesquisa, de Extensão e Integrados, Programas de Extensão e de Formação complementar no ensino de graduação, Disciplinas Especiais, Cursos de Extensão, Eventos, Estágios curriculares não obrigatórios e Disciplinas Eletivas, resultando em uma carga horária total para o curso de 3.330 horas.

b) As atividades acadêmicas de Estágio Supervisionado I: Didática e o Ensino de Física na Educação Básica, Estágio Supervisionado II: Metodologia e Prática do Ensino de Física, Estágio Supervisionado III: Metodologia e Prática do Ensino de Física, Estágio Supervisionado IV: Abordagens Histórico-Filosóficas no Ensino Médio e Estágio Supervisionado V: Metodologia e Prática do Ensino de Física - serão ofertadas no contraturno, matutino ou vespertino, mas poderá ser cursada no período noturno dependendo da disponibilidade de horário do estudante.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO, PROMOÇÃO E RETENÇÃO

Sistema de Avaliação

Considerar-se-á aprovado na atividade acadêmica, o estudante que obtiver média final igual ou superior a 6,0 (seis) e frequência de, no mínimo, 75% (setenta e cinco por cento).

Não haverá exame final.

As atividades acadêmicas obrigatória de natureza especial Estágio Supervisionado I: Didática e o Ensino de Física na Educação Básica, Estágio Supervisionado II: Metodologia e Prática do Ensino de Física, Estágio Supervisionado III: Metodologia e Prática do Ensino de Física, Estágio Supervisionado IV: Abordagens Histórico-Filosóficas no Ensino Médio e Estágio Supervisionado V: Metodologia e Prática do Ensino de Física devem atender aos objetivos do Projeto Pedagógico e terá sistema de avaliação e controle de frequência definidos em regulamentos próprios, aprovados pela Câmara de Graduação do CEPE. A média final definida não poderá ser inferior a 7,0 (sete).

Critérios de Promoção

O sistema de progressão do estudante será semestral e por atividade acadêmica, dependendo do cumprimento dos pré-requisitos e co-requisitos constantes do currículo do Curso.

Informações Adicionais

Renovação de Matrícula: SEMESTRAL

ANEXO E

Capítulo 1: "No país do Quantum"



1

No País do Quantum

Alice estava entediada. Todos os seus amigos estavam de férias, visitando os parentes e ela, por causa da chuva, ficou trancada em casa, vendo televisão. Naquela tarde já tinha assistido ao quinto episódio de um curso de introdução ao Esperanto, a um programa de jardinagem e a uma propaganda política. Alice estava entediada de verdade.

Olhou para o livro que estava no chão, ao lado da cadeira. Era uma edição de Alice no País das Maravilhas que ela, mais cedo naquele dia, tinha deixado por ali ao acabar de ler. "Não sei por que não pode haver desenhos e programas mais interessantes na televisão", divagava. "Queria ser como a outra Alice. Ela estava entediada e descobriu o caminho para uma terra cheia de seres interessantes e acontecimentos estranhos. Se houvesse algum jeito de encolher para flutuar através da tela da televisão, talvez eu pudesse encontrar várias coisas fascinantes." Frustrada, ela olhava para a tela, onde naquele momento uma imagem do primeiro-ministro dizia que, feitas todas as considerações, as coisas estavam bem

melhores do que três anos antes, ainda que nem sempre parecessem assim. Ficou um pouco surpresa ao ver a imagem do rosto do primeiro-ministro se desmanchar devagarinho e se transformar numa névoa de pontinhos brilhantes que dançavam e que pareciam fluir para dentro da TV, como se estivessem chamando por ela. "Puxa", disse Alice, "acho que eles querem que eu os siga!" Levantou-se de um salto e foi em direção à televisão, mas tropeçou no livro que tinha displicentemente largado no chão, e caiu de cabeça.

Enquanto caía, espantou-se ao ver a tela ficar enorme, e se surpreendeu cercada pelos pontinhos dançantes que fluíam para dentro da imagem. "Não consigo ver nada com esses pontos dando voltas ao meu redor", pensou. "É como estar perdida numa tempestade de neve. Não consigo nem mesmo ver meus pés. Queria ver só um pouquinho. Não dá nem para saber onde estou."

Naquele momento, Alice sentiu seus pés encostarem em algo sólido e se viu sobre uma superfície plana e dura. A sua volta os pontinhos começavam a sumir e ela percebeu que estava cercada por formas indefinidas.

Olhou mais de perto para a que estava mais próxima e observou uma figura pequena, da altura da sua cintura, no máximo. Era muito difícil defini-la, pois ficava pulando de um lado para outro e se mexendo tão rápido que mal dava para ver direito. A forma parecia estar carregando algum tipo de bengala, ou talvez um guarda-chuva fechado, que ficava apontado para cima. "Olá", Alice se apresentou educadamente. "Eu sou a Alice. Posso saber quem você é?"

"Sou um elétron", disse a forma. "Sou um elétron spin-para cima. É fácil me distinguir da minha amiga ali, a elétron spin-para baixo, que é obviamente muito diferente de mim." E disse para si mesmo, num tom baixinho, algo que soou como "Vive la différence". Pelo que Alice pôde ver, o outro elétron era quase igual, a não ser pelo guarda-chuva, ou o que quer que fosse aquilo, que apontava para baixo, na direção do chão. Era difícil ter certeza, uma vez que a figura também estava pulando de um lado para outro, tão rapidamente quanto a primeira.

"Por favor", disse Alice a seu mais novo conhecido. "Poderia fazer

a gentileza de parar por um momento para que eu possa vê-lo com mais clareza?"

"Sou bastante gentil", disse o elétron, "mas receio que não haja espaço bastante. Mas vou tentar, de qualquer forma." Assim dizendo, ele começou a diminuir a sua taxa de agitação. Mas quanto mais devagar se movia, mais se expandia para os lados e mais difuso ia ficando. Naquele momento, apesar de não se mover rapidamente, ele estava tão indefinido e tão fora de foco que Alice não conseguia vê-lo com mais clareza do que antes. "Isto é o melhor que posso fazer", resfolegou o elétron. "Receio que quanto mais lentamente eu me mover, mais espalhado eu fico. As coisas são assim aqui no País do Quantum: quanto menos espaço você ocupa, mais rápido você tem de se mover, é uma das regras, e não há nada que eu possa fazer."

"Realmente não há espaço para diminuir a velocidade aqui", continuou o companheiro de Alice enquanto recomeçava a pular rapidamente de um lado para outro. "A estação está ficando tão lotada que preciso ser mais compacto." De fato, no espaço em que Alice se encontrava estava lotado pelas figurinhas que se espremiavam uma ao lado da outra, dançando e se movendo febrilmente.

Partículas no nível atômico diferem de objetos em escala macroscópica.

Elétrons são muito pequenos e não apresentam características particulares, sendo completamente idênticos uns aos outros. De fato, eles têm algum tipo de rotação, apesar de não ser possível dizer exatamente o que é que está em rotação. Uma característica peculiar é que todos os elétrons giram à mesmíssima taxa, não importando em que direção a rotação é medida. A única diferença é que uns giram em uma direção e outros giram em outra direção. Dependendo da sua direção da rotação, os elétrons são conhecidos como spin-para cima ou spin-para baixo.

"Que seres estranhos", pensou Alice. "Acho que nunca conseguirei ver como são de verdade já que não param quietos e nada indica que um dia pararão." Porque não parecia ser possível fazê-los se moverem mais devagar ela resolveu tentar um outro assunto. "Você poderia me dizer por gentileza que tipo de estação é esta onde nós estamos?", ela



perguntou.

"Numa estação ferroviária, é claro", respondeu alegremente um dos elétrons (era muito difícil para Alice dizer qual deles tinha falado, pois todos eram muitíssimo parecidos). "Vamos pegar o trem de ondas para aquela tela que você vê. Você vai pegar depois o expresso fóton, acredito, se quiser ir mais longe."

"Está falando da tela de televisão?", Alice perguntou.

"Ora essa, é claro", disse alto um dos elétrons. Alice podia jurar que não tinha sido o mesmo que respondera à primeira pergunta, mas era muito difícil ter certeza. "Venha! O trem está aqui e temos de embarcar."

De fato, Alice pôde ver uma fila de pequenos vagões alinhados na estação. Eram todos bem pequenos. Alguns estavam vazios, alguns estavam ocupados por um elétron, e outros por dois elétrons. Os vagões enchiam-se rapidamente — na verdade, parecia que não restava mais nenhum vazio — mas Alice percebeu que nenhum dos vagões levava mais

do que dois elétrons. Quando eles passavam perto desses vagões, os dois ocupantes gritavam "Lotado! Lotado!".

"Vocês não poderiam espremer mais do que dois num vagão, estando o trem assim tão cheio?", Alice perguntou a seus companheiros.

"Oh, não! Nunca além de dois elétrons juntos, esta é a regra."

"Acho então que teremos de ocupar vagões diferentes", disse Alice um pouco contrariada, mas o elétron a tranquilizou.

O princípio da incerteza de Heisenberg diz que nenhuma partícula pode ter valores bem definidos para posição e velocidade ao mesmo tempo. Isto significa que uma partícula não pode permanecer estacionária numa determinada posição, já que uma partícula estacionária tem uma velocidade bem definida: a velocidade de valor zero.

"Você não é problema algum! Você pode entrar no vagão que quiser, é claro!"

"Não vejo como isso será possível", respondeu Alice. "Se um vagão estiver cheio demais para vocês, com certeza não haverá espaço para mim também."

"De jeito nenhum! Os vagões só podem acomodar dois elétrons, por isso os lugares para elétrons devem estar quase todos tomados, mas você não é um elétron! Não há nenhuma outra Alice no trem, então há espaço mais do que suficiente para uma Alice em qualquer um dos vagões."

Alice não entendia tudo que ele dizia, mas, temendo que o trem partisse logo, começou a procurar um lugar vago que pudesse acomodar mais um elétron. "E este aqui?", perguntou ao seu companheiro. "Aqui tem um vagão com um elétron só. Dá para você entrar aqui?"

"Claro que não!" ele disparou, horrorizado. "Este também é um elétron spin-para cima. Não posso dividir um vagão com outro elétron spin-para cima, que sugestão! É totalmente contra o meu princípio."

"Contra os seus princípios, é o que quer dizer?", Alice perguntou.

"Quero dizer aquilo que disse. Contra o meu princípio, ou melhor, contra o princípio de Pauli, que proíbe que dois de nós, elétrons, façamos a mesma coisa ao mesmo tempo, o que inclui ocupar o mesmo espaço e ter o mesmo spin", ele respondeu, ofendido.

Alice não conseguia entender o que o tinha deixado tão magoado, mas deu uma olhada rápida ao seu redor para ver se encontrava um outro vagão que fosse mais apropriado para ele. Acabou conseguindo achar um que abrigava um único elétron do tipo spin-para baixo, e o companheiro de Alice prontamente pulou para dentro. Alice ficou surpresa ao ver que, apesar de o pequeno vagão agora parecer cheio, de alguma forma havia espaço o bastante para ela.

Assim que ocuparam seus lugares, o trem começou a andar. A viagem foi monótona, e a paisagem desinteressante. Tanto que Alice ficou contente ao ver que o trem diminuía de velocidade. "Esta deve ser a tela, suponho", pensou Alice. "Estou ansiosa para saber o que acontecerá agora."

Elétrons são absolutamente idênticos e obedecem ao princípio da exclusão de Pauli (ver Capítulo 5), que impede que haja mais do que um elétron no mesmo estado (ou dois, quando você inclui as diferentes direções possíveis para o spin).

Enquanto os elétrons saltavam do trem para a tela, uma grande agitação tomou conta do lugar. "O que está acontecendo?", Alice

perguntava alto. "Por que todos estão tão excitados?" Suas perguntas eram respondidas por um aviso que parecia surgir do ar que a cercava.

"O fósforo da tela está agora sendo excitado pelos elétrons que chegam, e assim teremos em breve a emissão de fótons. Aguardem a partida do expresso fóton." Alice olhou à sua volta para tentar ver a chegada do expresso, quando formas brilhantes e luminosas passaram correndo através da plataforma. Alice foi pega de surpresa no meio da multidão e levada junto com ela enquanto todos se reuniam dentro do mesmo vagão. "Eles não parecem estar preocupados com nenhum princípio, de Pauli ou de qualquer outro", pensou Alice enquanto as figuras iam se espremendo em torno dela. "Estes aqui certamente não se incomodam de estar no mesmo lugar. Acho que o expresso vai partir logo. Imagino onde será... que vai parar", concluiu ao descer na outra plataforma. "Puxa! Foi uma viagem rápida, com certeza." (Alice estava corretíssima neste ponto. A viagem não durou tempo algum, pois o tempo fica efetivamente congelado para qualquer coisa que viaje com a velocidade da luz.) Novamente ela se viu cercada por uma multidão de elétrons, todos correndo para longe da plataforma.

"Venha!", um deles gritou para ela ao desembarcar. "Devemos sair da estação agora se quisermos ir a algum lugar."

"Desculpe", perguntou Alice, hesitante, "você é o mesmo elétron com quem eu estava falando antes?"

"Sou", respondeu, enquanto disparava por uma passagem lateral. Alice foi arrastada pela multidão de elétrons e conduzida através da entrada principal da plataforma.

"Puxa vida, que coisa mais irritante!", disse Alice. "Perdi de vista a única pessoa que conheço neste lugar estranho e não tenho ninguém que me explique o que está acontecendo."

"Não se preocupe, Alice", disse uma voz à altura de seu joelho. "Vou lhe mostrar aonde ir." Era um dos elétrons.

"Como sabe meu nome?" perguntou Alice com espanto.

"Simples. Sou o mesmo elétron que estava falando com você antes."

"Não pode ser!", exclamou ela. "Vi aquele elétron indo em outra direção. Talvez não fosse o mesmo com quem eu estava falando antes."

"Certamente era."

"Então você não pode ser o mesmo", disse Alice, logicamente.

"Vocês não podem ser o mesmo elétron, sabia?"



"Oh, sim, podemos!", replicou o elétron. "Ele é o mesmo. Eu sou o mesmo. Nós todos somos o mesmo, sabia? Exatamente o mesmo!"

"Isto é ridículo!", argumentou Alice. "Você está aqui ao meu lado enquanto o outro foi para algum lugar naquela direção, por isso vocês dois não podem ser a mesma pessoa. Um de vocês tem de ser diferente."

"Não mesmo", gritou o elétron, pulando de um lado para outro, ainda mais rápido por causa de sua excitação. "Somos todos idênticos. Não há como nos diferenciar. Por isso, veja, ele deve ser o mesmo e eu devo ser o mesmo também."

Nesse momento, a multidão de elétrons que rodeava Alice começou a gritar: "Eu sou o mesmo", "Eu sou o mesmo também", "Eu sou o mesmo que você é", "Eu também sou o mesmo que você." O tumulto era terrível. Alice fechou os olhos e pôs as mãos nos ouvidos até o barulho acabar.

Quando tudo estava quieto novamente, Alice abriu os olhos e abaixou as mãos. Viu que não havia mais sinal da multidão de elétrons e

que ela estava sozinha, saindo pela entrada da estação. Olhando em volta, viu-se numa rua que, à primeira vista, parecia bem normal. Virou à esquerda e começou a caminhar pela calçada.

Antes que fosse muito longe, cruzou com uma figura na frente de uma passagem procurando melancolicamente algo em seus bolsos. Era baixo e muito pálido. Era difícil ver seu rosto com nitidez, assim como era o caso com todo mundo que Alice tinha conhecido recentemente. Mas ele parecia bastante com um coelho, pensou Alice. "Meu Deus! Meu Deus! Estou atrasado e não consigo encontrar as minhas chaves. Eu tenho de entrar diretamente!" Assim dizendo, ele se afastou um pouco e voltou correndo em direção à porta.

Correu tão rápido que Alice não foi capaz de vê-lo em nenhuma posição. Em vez disso, viu uma série de imagens dele nas diferentes posições que ocupara ao longo do seu trajeto. As imagens iam do ponto de partida até a porta onde, ao invés de parar como Alice esperava, continuavam porta adentro, diminuindo cada vez mais até ficarem pequenas demais para serem vistas. Alice mal teve tempo de registrar essa estranha série de imagens quando a figura ricocheteou de volta na mesma velocidade, deixando novamente uma série de imagens. Dessa vez elas terminaram abruptamente com o infeliz personagem caído de costas, em cima de um bueiro. Iguamente decidido, ele se levantou e disparou de novo em direção à porta. Novamente apareceu a série de imagens que se encolhiam para dentro da porta, e novamente ele ricocheteou e acabou caindo de costas.

Enquanto Alice corria em sua direção, ele repetiu o movimento várias vezes, jogando-se contra a porta e novamente caindo de costas. "Pare, pare!", gritou Alice. "Não faça isso. Você vai acabar se machucando."

A pessoa parou de correr e olhou para Alice. "Olá, minha querida. Receio que eu deva fazer isto. Estou trancado do lado de fora e preciso entrar logo, por isso não tenho opção senão tunelani tvavés da barreira." Alice olhou para a porta, que era grande e sólida. "Não acho que terá muita chance de atravessá-la correndo e se atirando contra ela", disse. "Está tentando derrubá-la?"

"Oh, não, certamente que não! Não quero destruir minha linda porta. Apenas desejo atravessá-la. Por outro lado, temo que o que disse seja verdade. A probabilidade de conseguir atravessá-la não é grande, realmente, mas devo tentar." I Hzendo isso, atirou-se novamente contra a porta. Alice o abandonou, achando que seria perda de tempo, e se afastou no momento em que ele voltava cambaleante mais uma vez.

Após alguns passos, Alice não pôde resistir e deu uma olhada para trás, para ver se, por acaso, ele tinha desistido. Viu mais uma vez a série de imagens que iam cm direção à porta e se encolhiam ao chegar lá. Ela esperou pelo ricochete. Das < >ut 1 .is vezes tinha sido imediato, mas desta vez nada houve. A porta estava lá, sólida 6 sozinha, e não havia sinal do seu conhecido. Após alguns segundos em que nada íii onteceu, Alice ouviu o ruído de trancas e correntes vindo de detrás da porta, que se abriu. Seu conhecido reapareceu e acenou para ela. "Que sorte a minha!", disse ele "A probabilidade de penetrar uma barreira grossa como esta é realmente muito pequena. E uma sorte espantosa eu ter conseguido atravessá-la em tão pouco tempo." Fechou a porta cm seguida com uma batida sólida que indicava o término daquele encontro. Alice continuou sua caminhada.

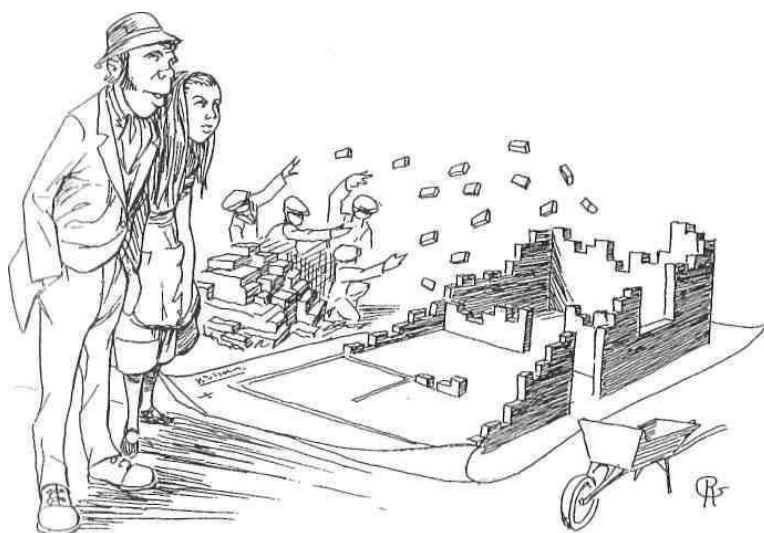
Um pouco à frente ela chegou a um terreno vazio ao lado da rua, onde um grupo de operários estava reunido em volta de uma pilha de tijolos. Alice deduziu que fossem operários, pois estavam descarregando mais tijolos de dentro de um carrinho. "Bem, pelo menos estas pessoas estio se comportando de maneira sensata", pensou consigo mesma. Naquele instante, um outro grupo dobrou a esquina correndo, carregando algo que se assemelhava a um enorme tapete enrolado, e começou a desenrolá-lo no terreno. Alice percebeu então que aquilo era algum tipo de planta baixa de um prédio. A planta parecia ser bem grande, já que cobria a maior parte do espaço disponível. "Puxa! Acho que deve ser do mesmo tamanho do prédio que eles vão construir", disse Alice, "mas como conseguirão construir alguma coisa se a planta já ocupa todo o espaço?"

Os operários acabaram de pôr a planta na posição e voltaram à pilha de tijolos. Começaram a pegar os tijolos e jogá-los aparentemente a esmo em cima da planta. Tudo estava confuso — os tijolos catam ora num

lugar, ora em outro — e Alice não via nenhum objetivo nisso. "O que estão fazendo?" perguntou a um homem que estava afastado para o lado. Como ele parecia não estar fazendo nada, ela deduziu que fosse o mestre-de-obras. "Vocês só estão empilhando os tijolos desorganizadamente. Não deviam estar construindo um prédio?"

"Com certeza, querida. E estamos", respondeu o mestre-de-obras. "É bem verdade que as flutuações aleatórias ainda são grandes o bastante para esconder o padrão, mas assim que tivermos estabelecido a distribuição de probabilidades para o resultado que precisamos, estaremos conseguindo, não há o que temer."

Alice achou aquela demonstração de otimismo não muito convincente, mas ficou quieta e observou a chuva de tijolos que continuava a cair no terreno. Pouco a pouco, para sua surpresa, notou que alguns tijolos caíam mais em certas regiões do que em outras e que era possível distinguir paredes e vãos de portas. Ela olhava fascinada enquanto reconhecia as formas dos cômodos que iam surgindo daquele caos inicial. "Puxa, que impressionante!", disse. "Como conseguem fazer isso?"



"Ora, já não disse a você?", sorriu o mestre-de-obras. "Você nos viu estabelecer a distribuição de probabilidades antes de começarmos. É ela que especifica os lugares onde deve haver tijolos e onde não deve. Precisamos fazer isso antes de começar a deitar os tijolos porque não

sabemos onde eles vão parar quando os jogarmos, entende?", continuou.

"Não vejo por quê!", interrompeu Alice. "Estou acostumada a ver os tijolos serem postos um depois do outro, em linhas certas."

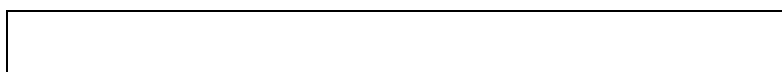
"Bem, não é assim que fazemos aqui em Quantum. Aqui não podemos controlar onde cada tijolo vai, apenas a probabilidade de que irá para um lugar ou outro. Isto quer dizer que quando há poucos tijolos, eles podem cair em quase todos os lugares e então não parecem ter nenhum tipo de padrão. Quando seu número aumenta, porém, você descobre que só há tijolos onde há alguma possibilidade de que eles estejam lá; e onde a probabilidade é maior, é onde haverá mais tijolos. Quando se lida com grandes quantidades de tijolos, tudo acaba FUNCIONANDO muito bem, é verdade."

Alice achou tudo isso muito esquisito, apesar de o mestre-de-obras falar com tanta precisão que até parecia fazer algum sentido. Não perguntou mais nada, pois as respostas dele apenas a confundiam mais. Agradeceu então pelas informações e continuou andando pela

A teoria quântica descreve o comportamento de partículas em termos de distribuições de probabilidade, e a observação real de partículas individuais ocorre aleatoriamente dentro destas distribuições. As probabilidades podem incluir processos classicamente proibidos, tais como a penetração de partículas através de uma estreita barreira de energia.

rua.

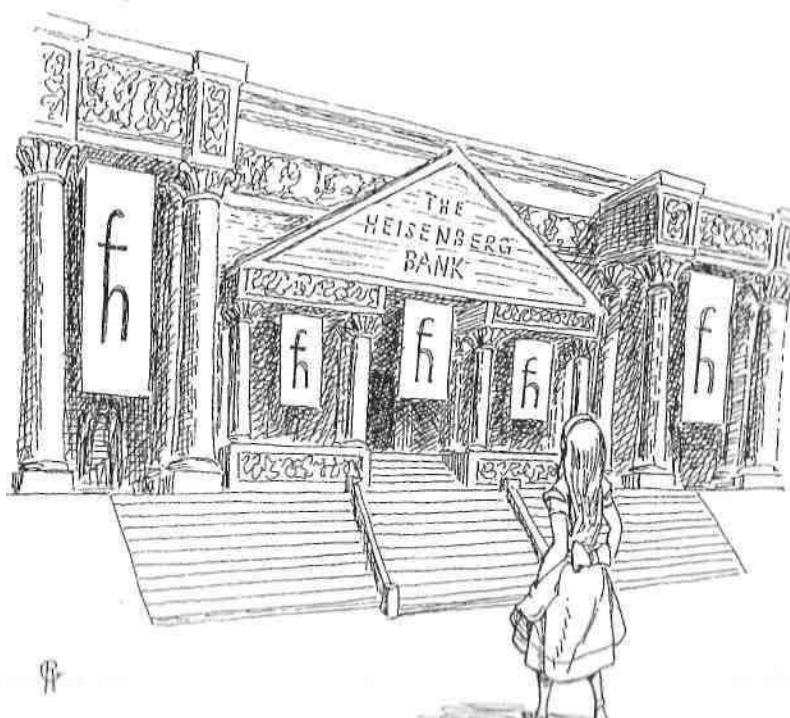
Não muito tempo depois, ela avistou uma janela onde um grande cartaz dizia:



<p>Insatisfeito com seu Estado?</p> <p>Gostaria de passar para um nível mais alto?</p> <p>Ajudaremos você a fazer a Transição por apenas 10 eV.</p> <p>(Oferta sujeita à limitação usual da exclusão de Pauli)</p>

"Tenho certeza de que deve ser alguma coisa muito excitante, mas não tenho ideia do que se trata, e se fosse perguntar a alguém, estou certa de que a resposta me deixaria ainda mais perdida do que estou agora", exclamou Alice desesperada. "Não entendi nada do que vi até agora. Queria encontrar alguém que me desse uma boa explicação sobre o que está acontecendo em volta de mim."

Não tinha percebido que havia falado alto até ouvir a resposta dada por um passante. "Se quiser entender o País do Quantum, vai precisar de alguém que lhe explique a mecânica quântica. Para isso, você deveria ir ao Instituto de Mecânica", aconselharam-na.



"Oh, serão eles capazes de me explicar o que está acontecendo aqui?", gritou Alice satisfeitíssima. "E serão capazes de me explicar todas as coisas que vi, assim como o cartaz naquela janela e o que quer dizer aquele 'eV'?"

"Acho que a Mecânica poderá lhe explicar a maior parte", respondeu seu informante, "mas como 'eV' são unidades de energia, provavelmente você deveria começar perguntando sobre elas no Banco Heisenberg, principalmente porque fica ali do outro lado da rua."

Alice olhou para onde ele apontava e viu uma grande construção com uma fachada muito pomposa, obviamente construída para impressionar. Tinha uma entrada com pilastras de pedra e, no topo, em letras garrafais, estava gravado o nome BANCO HEISENBERG. Alice atravessou a rua, subiu a longa escadaria que levava à porta grandiosa, e entrou.

ANEXO F

Capítulo 3: "O Instituto de Mecânica"

3

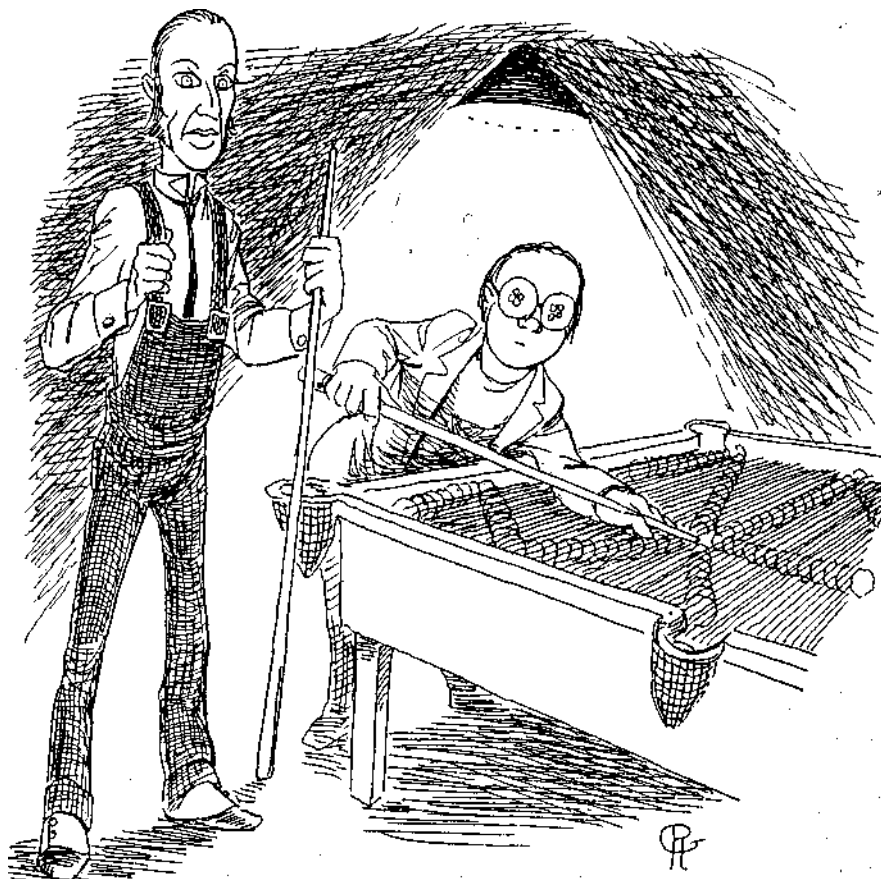
O Instituto de Mecânica

Alice examinou o prédio que estava à sua frente. Era uma modesta estrutura de tijolos, já meio castigada pelo tempo. Na frente, havia um cartaz que dizia se tratar do "Instituto de Mecânica". Ao lado do cartaz havia uma porta, em que alguém tinha pregado um aviso: "Não bata. Apenas entre." Alice experimentou e viu que a porta não estava trancada. Abriu-a e entrou.

Do outro lado da porta havia uma sala ampla e escura. No meio da sala havia uma área iluminada e clara. Dentro desta limitada região era possível distinguir alguma coisa com razoável nitidez. Mais para além, jazia uma extensão aparentemente ilimitada de escuridão na qual nada significativo podia ser discernido. Na mancha de luz ela viu uma mesa de bilhar com duas figuras se movendo em volta. Alice andou em sua direção e quando se aproximou, eles se voltaram para olhar para ela. Era uma dupla bem estranha. Um era alto e angular e usava uma camisa branca engomada com colarinho duro e também alto, uma gravata estreita e, para surpresa de Alice, um macacão. Seu rosto era aquilino, e ele tinha costeletas fartas. Ele olhou para ela com tanta intensidade que Alice sentiu que ele podia perceber até mesmo o menor detalhe naquilo que observava. Seu companheiro era menor e mais jovem. Seu rosto redondo era decorado com uns óculos grandes, de armação de metal; era difícil perceber para onde ele estava, olhando, ou mesmo onde exatamente estavam seus olhos. Ele vestia um avental branco de laboratório sob o qual aparecia uma camiseta com o desenho de algo vagamente atômico na frente. Não era fácil dizer com certeza o que era, pois as cores estavam desbotadas.

"Com licença, este é o Instituto de Mecânica?" Alice perguntou, mais para puxar conversa. Pelo cartaz, ela já sabia que era.

"Sim, minha cara", disse o mais alto e impressionante dos dois. "Eu sou um Mecânico Clássico do Mundo Clássico, e estou visitando meu colega, aqui, que é um Mecânico Quântico. Qualquer que seja seu problema, tenho certeza de que um de nós poderá ajudá-la. É só esperar até que terminemos nossas jogadas."



Ambos se viraram para a mesa de bilhar. O Mecânico Clássico mirou com cuidado, considerando as ínfimas panes de todos os ângulos envolvidos. Finalmente, deu a tacada bem à vontade. A bola bateu e voltou numa impressionante série de ricochetes e acabou por entrar em colisão com a bola vermelha, que foi parar com precisão dentro de uma das caçapas. "Aí está", exclamou com satisfação ao tirar a bola de dentro do buraco. "É assim que se faz, está vendo? Observação cuidadosa e exata, seguida de ação precisa. Procedendo assim, você obtém o resultado que escolher."

Seu companheiro não respondeu, tomou seu lugar na mesa e fez um movimento vago com seu taco. Após suas experiências anteriores, Alice não ficou surpresa ao ver a bola disparar em todas as direções ao

mesmo tempo, e não havia lugar na mesa onde ela pudesse dizer com certeza que a bola não havia estado, embora não pudesse dizer igualmente onde a bola havia estado. Após um intervalo, o jogador olhou dentro de uma das caçapas, enfiou a mão e tirou a bola vermelha.

"Se não se importa que eu faça uma observação", disse Alice, "parece que você joga de forma muito diferente."

"É isso mesmo", respondeu o Mecânico Clássico. "Odeio quando ele dá tacadas desse jeito. Gosto que tudo seja feito com muito cuidado e precisão e que todos os detalhes sejam planejados antecipadamente. Contudo", acrescentou, "imagino que você não tenha vindo aqui para nos ver jogar bilhar, por isso, pode nos dizer o que é que quer saber."

Alice contou novamente todas as suas experiências desde que tinha chegado ao País do Quantum e explicou como tinha achado tudo muito confuso e como tudo parecia estranho e indefinido. "Eu nem sei como encontrei este prédio", concluiu. "Me disseram que a interferência provavelmente me levaria para o lugar certo, mas não consegui entender o que aconteceu."

"Bem", disse o Mecânico Clássico, que parecia ter escolhido a si mesmo para ser o porta-voz da dupla. Eu não posso dizer que entendi tudo também. Como eu já disse, gosto das coisas claras, com a causa sendo seguida pelo efeito, com tudo muito claro e previsível. Para dizer a verdade, muitas coisas que acontecem aqui não fazem o menor sentido para mim", ele murmurou, num tom de confiança. "Eu saí do Mundo Clássico só para dar uma voltinha. Lá é um lugar esplêndido, onde tudo acontece com precisão mecânica. A causa é seguida do efeito de uma maneira maravilhosamente previsível, o que faz com que tudo faça sentido e que você saiba o que vai acontecer. E tem mais: os trens estão sempre na hora", acrescentou. Ver nota 1 no final do Capítulo.

"Parece impressionante", disse Alice com educação. "Para ser assim tão organizado, tudo deve ser controlado por computadores."

"Não", respondeu o Mecânico Clássico. "Não usamos computador algum. Na verdade, coisas eletrônicas não funcionam no mundo clássico. Somos melhores com máquinas a vapor. Eu não me sinto muito à vontade, aqui no País do Quantum. O meu amigo aqui está muito mais familiarizado

com as condições quânticas.

"Contudo", ele continuou, mais seguro de si, "eu posso lhe dizer o que é interferência. Isso acontece na mecânica clássica também. Siga-me e demonstrarei como funciona."

Ele levou Alice através de uma porta, depois por um longo corredor e para dentro de uma outra sala. Esta sala estava bem iluminada, com uma luz clara que iluminava todos os cantos da sala e que não parecia vir de nenhuma fonte específica. Eles estavam de pé numa estreita passarela de madeira, que dava a volta na sala, encostada nas paredes. O chão no meio da sala estava coberto com uma espécie de substância cinza brilhante que não parecia sólida. Flashes de luz aleatórios atravessavam este material, assim como um televisor com o canal fora do ar.

O guia explicou para Alice, "Esta é a sala de gedanken, que quer dizer 'sala de pensar'. Você deve saber que em alguns clubes existem salas de escrever e salas de ler. Bem, nós temos uma sala de pensar. Aqui, os pensamentos das pessoas tomam forma, para que todos possam vê-los. Aqui podemos fazer experimentos de pensamento, que nos permitem descobrir o que aconteceria em várias situações físicas, sendo muito mais baratos do que os experimentos de verdade, é claro.

"Como é que funciona?", perguntou Alice. "E só pensar em alguma coisa e ela aparece?"

"Correto; em essência, é só o que precisa fazer."

"Oh, por favor, posso experimentar?", Alice perguntou.

"Certamente, se quiser."

Alice pensou com intensidade na substância móvel e brilhante. Para sua surpresa e alegria, onde antes não havia nada, ela viu um grupo de coelhos peludos saltando para lá e para cá.

"Sim, muito bonito", disse o Mecânico, muito impaciente. "Mas isso não ajuda a explicar a interferência." Ele fez um gesto e todos os coelhos desapareceram, a não ser por um pequenininho que ficou, sem ser notado, num dos cantos da área.

"Interferência", ele começou, com autoridade, "é algo que acontece com as ondas. Existem vários tipos de ondas nos sistemas físicos, mas é mais simples pensar nas ondas da água." Ele olhou com força para o chão, que, bem na frente dos olhos de Alice, se transformou num lençol d'água, com pequenas ondas percorrendo a superfície. Num dos cantos, o coelho afundou com um "plop", quando o chão debaixo dele virou água. Ele tentou sair e olhou para eles. Então ele se sacudiu, olhou com pesar para seu pêlo encharcado, e sumiu.

"Agora, um pouco de ondas", continuou o Mecânico Clássico, sem prestar atenção ao infeliz coelho. Alice olhou sem vontade para o chão e uma onda veio estourando através da superfície até quebrar dramaticamente sobre uma praia, num dos lados do chão.

"Não, não é este tipo de onda que queremos. Essas ondas grandes que estouram são complicadas demais. Nós queremos aquele tipo de onda mais suave, que se espalha quando você joga uma pedra na água." Enquanto ele falava, uma série de ondas circulares começou a se espalhar, partindo do centro da água.

"Mas precisamos pensar no que chamamos de ondas planas, que se movem todas na mesma direção." As ondulações circulares se transformaram numa série de longos sulcos paralelos, como um campo arado e molhado, todas se movendo através do chão, de um lado a outro.

"Agora, poremos uma barreira no meio." Um obstáculo baixo surgiu no centro, dividindo o chão em dois. As ondas iam até a barreira e colidiam contra ela, mas não havia jeito de passarem para o outro lado, que agora estava calmo e parado.

"Fazemos um buraco na barreira agora, para que as ondas possam atravessar por ele." Uma fenda pequena, muito bem-feita, apareceu um pouco à esquerda do ponto central da barreira. Ao passar por essa brecha, as ondas se espalhavam circularmente pela calma região do outro lado da barreira.

"Agora veja o que acontece quando temos duas fendas na barreira", exclamou o Mecânico. Instantaneamente, havia uma fenda à esquerda e outra à direita do ponto central. Ondulações circulares espalhavam-se a partir de ambos. Onde elas se encontravam, Alice pôde ver que a água

subia e descia muito mais do que quando havia somente uma fenda na barreira, enquanto em outros lugares ela mal se movia.

"Você vai entender quando congelarmos o movimento. É claro que é possível fazer isso num experimento pensado." O movimento na água foi interrompido e as ondulações ficaram congeladas no lugar em que estavam, como se toda a área tivesse sido abruptamente transformada em gelo.

"Vamos marcar agora as regiões de amplitude máxima e mínima", continuou, determinado, o Mecânico Clássico. "A amplitude mede o quanto a água se deslocou a partir do nível que tinha quando estava parada." Duas setas fluorescentes apareceram, flutuando no espaço por sobre a superfície. Uma tinha a cor das maçãs verdes e estava apontando para um local onde a perturbação na superfície tinha sido maior. A outra seta era de um vermelho meio pálido e apontava o local onde a superfície quase não tinha sido perturbada.

"Você poderá ver o que está acontecendo se virmos o efeito de só uma fenda de cada vez", ele disse, com um entusiasmo crescente. Uma das fendas na barreira desapareceu e só sobraram as ondulações circulares que partiam da outra fenda, ainda congeladas em suas posições como se fossem feitas de vidro. "Agora, vamos mudar para a outra fenda." Alice percebeu que a diferença era muito pequena entre um local e outro. A posição da fenda tinha se alterado e o padrão de ondulações circulares que passava por ela se moveu um pouco, mas no aspecto geral parecia o mesmo. "Temo que não consiga entender o que você está tentando me mostrar", ela disse. "Os dois casos parecem o mesmo para mim."

"Vai ser mais fácil ver a diferença se eu passar rapidamente de um caso para outro." A fenda na barreira começou a pular de um lado para outro, primeiro para a direita e depois para a esquerda. Enquanto isso acontecia, o padrão de ondulações avançava e retrocedia, primeiro para a direita, depois para a esquerda. "Veja o padrão de ondas em baixo da seta verde", disse o Mecânico, que, aos olhos de Alice, estava mais excitado com o assunto do que deveria. Ela, porém, fez o que ele pediu e percebeu que no local indicado pela seta havia uma elevação na água, em ambos os casos. "Cada fenda na barreira produziu uma onda que se eleva neste

ponto particular. Quando as duas fendas estão abertas, a onda é duas vezes mais alta aqui e a elevação e a depressão totais são muito maiores do que quando só há uma fenda. A isso chamamos de interferência construtiva.

"Agora veja o padrão das ondas em baixo da seta vermelha." Ali Alice viu que, enquanto uma fenda causava uma elevação naquele ponto, a outra produzia uma depressão. "Veja que nesta posição a onda de uma fenda sobe enquanto a onda da outra desce. Quando as duas se encontram, elas se cancelam mutuamente e, no total, a perturbação desaparece. A isso chamamos de interferência destrutiva.

"Isso é, na verdade, tudo que há para saber sobre interferência de ondas. Quando duas ondas se atravessam e se combinam, suas amplitudes, as quantidades que medem o quanto sobem ou descem, também se combinam. Em alguns lugares, as ondas participantes estão todas indo no mesmo sentido, então as perturbações se somam e o resultado final é considerável. Em outros lugares, elas vão em sentidos opostos e se cancelam mutuamente."

"Sim, acho que entendi", ela disse. "Quer dizer que as portas do Banco funcionavam como as fendas na barreira, causando um grande efeito nos lugares onde eu precisava ir e cancelando-se mutuamente em outras posições. Mas ainda não vejo como isso se aplica ao meu caso. Com suas ondas de água, você diz que há mais da onda em um lugar e menos no outro por causa desta interferência, mas a onda está espalhada por toda a região, enquanto eu estou em um só lugar de cada vez."

"Exatamente!" gritou o Mecânico Clássico triunfante. "É esse o problema. Como você mesma disse, você está em um só lugar. Você é mais como uma partícula do que como uma onda, e as partículas se comportam de maneira bem diferente no sensato mundo clássico. Uma onda se espalha por uma ampla área e nós só vemos uma pequena porção dela em qualquer posição. Por causa da interferência, você pode ter mais ou menos dela em posições diferentes, mas, ainda assim, você estará olhando para apenas uma pequena parte da onda. Uma partícula, por outro lado, está localizada em algum ponto. Olhando em posições diferentes, você vê a partícula inteira ou ela simplesmente não está lá. Na

Mecânica Clássica as partículas não exibem efeitos de interferência, como provaremos."

Ele virou para o chão da sala de gedanken e olhou-o com firmeza. De um espelho d'água, a superfície se transformou em uma área blindada com barreiras reforçadas ao longo do perímetro, altas o bastante para eles se protegerem atrás delas. De um lado a outro, no meio do chão, onde antes havia a barreira de ondas, erguia-se uma parede blindada com uma estreita abertura um pouco à esquerda do centro. "Podemos ver agora o mesmo arranjo, só que fiz umas alterações para que possamos observar partículas rápidas. Elas são mais ou menos como as balas de uma arma, e é por isso mesmo que vamos usar uma."

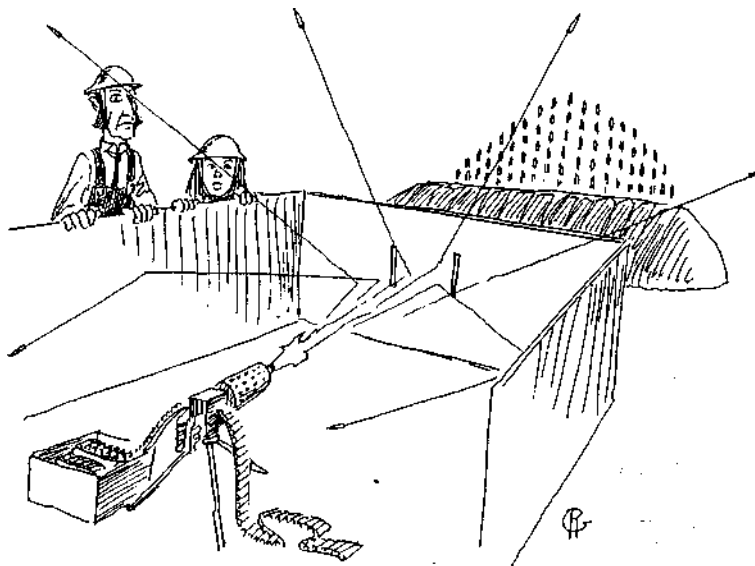
A interferência é, classicamente, uma propriedade das ondas. Ela ocorre quando amplitudes, ou perturbações, de diferentes fontes se encontram e se combinam somando em alguns lugares e subtraindo ou cancelando em outros. Isso resulta em regiões de atividade intensa ou baixa, respectivamente. Pode-se ver esse efeito no padrão produzido quando as ondulações deixadas por dois barcos se cruzam umas com as outras. Os efeitos da interferência podem causar também a má recepção de um televisor quando as ondas refletidas por um prédio próximo interferem com o sinal direto. A interferência requer distribuições extensas e sobrepostas. Na Física Clássica, partículas ocupam uma posição determinada e não produzem interferência.

Ele fez um gesto em direção a uma das extremidades da sala onde apareceu uma metralhadora de aparência desagradável, com muitas caixas de munição empilhadas ao lado. "Esta arma não está muito bem apoiada e por isso não atira sempre na mesma direção. Algumas balas atingirão a fenda na parede e passarão para o outro lado, como parte da onda fez no nosso último experimento pensado. A maioria delas, é claro, atingirá a parede, ricocheteando. Oh, isso me faz lembrar", ele disse, de repente. "Devemos usar isso, caso alguma bala nos atinja ao ricochetear." Pegando um par de capacetes de aço, ele estendeu um para Alice.

"É mesmo necessário?", ela perguntou. "Se o experimento é só pensado, essas balas são também pensadas e não podem nos causar

dano algum."

"Talvez, mas você pode pensar que foi atingida por uma bala e isso não seria muito legal."



Alice colocou o capacete. Ela não sentia o peso dele sobre sua cabeça, nem achava que ele adiantaria para alguma coisa, mas continuar discutindo também não seria muito útil. O Mecânico retesou seu corpo, acenou como se fosse um imperador e a metralhadora começou a disparar, fazendo muito barulho. As balas saíam num fluxo irregular. A maioria acertava a parede e zumbia para longe em todas as direções, mas algumas passavam pelas aberturas na barreira e chegavam à parede do outro lado. Alice ficou intrigada ao perceber que, quando uma bala atingia a parede do outro lado da barreira, ela parava imediatamente e se elevava devagar para ficar flutuando no ar bem acima do ponto onde atingira a parede.

"Como você pode ver, enquanto a onda de água se espalhava por toda a parede além da fenda, uma bala a atingirá em apenas uma posição. Neste experimento, porém, há uma maior probabilidade da bala passar direto pela fenda do que resvalar na borda da abertura e ir parar muito para o lado. Se esperarmos um pouco mais, veremos como a probabilidade varia para os diferentes pontos ao longo da parede." Enquanto o tempo passava e o ar ia ficando cheio de balas voadoras, o número daquelas que flutuavam perto da parede crescia com regularidade. Enquanto observava, Alice começou a distinguir um padrão que ia se formando.

"Veja, já dá para perceber como as balas que passaram pela fenda se distribuem pela parede", disse o Mecânico quando a arma parou. "A maioria foi parar diretamente na direção da abertura, e o número vai decrescendo tanto para um lado quanto para outro. Agora veja o que acontece quando a fenda é deslocada um pouco para a direita." Com outro gesto seu, as balas flutuantes caíram no chão e a metralhadora recomeçou. Apesar de a demonstração ser barulhenta e bem perturbadora, Alice percebeu que o resultado final foi o mesmo que da vez anterior. Sinceramente, foi decepcionante.

"Como pode ver", disse o Mecânico com uma confiança indevida, "a distribuição é parecida com a anterior, mas levemente deslocada para a direita, uma vez que o centro agora está do outro lado da abertura." Alice não percebeu diferença nenhuma, mas estava pronta para aceitar o que ele dissesse.

"Agora", disse o Mecânico em tom teatral, "vejamos o que acontece quando ambas as fendas estão presentes." Até onde Alice pôde perceber, não fazia a menor diferença. Exceto que, com as duas fendas, mais balas passariam e atingiriam a parede. Desta vez, ela decidiu fazer um comentário. "Receio que, para mim, todas as vezes tenham sido iguais", ela disse, desculpando-se.

"Exatamente!", respondeu satisfeito o Mecânico. "Só que, como você deve ter observado, o centro da distribuição agora fica no meio, entre as fendas. Tínhamos uma distribuição para a probabilidade de as balas passarem pela fenda da esquerda e outra distribuição para as que passariam pela fenda da direita. Com as duas fendas, as balas podem passar por qualquer uma delas. A distribuição total, então, será a soma das probabilidades obtidas para cada uma das fendas, já que as balas devem passar por uma ou por outra. Elas não podem passar por ambas ao mesmo tempo", ele acrescentou, dirigindo-se ao Mecânico Quântico que acabava de entrar na sala.

"É o que você diz", respondeu o colega, mas como pode ter tanta certeza? Veja só o que acontece quando repetimos nosso experimento de gedanken com elétrons."

Desta vez, quem fez um gesto em direção ao chão da sala foi o

Mecânico Quântico. Seus gestos não eram tão decididos quanto os de seu colega, mas pareceu funcionar do mesmo jeito. A metralhadora e as paredes blindadas desapareceram. O chão voltou a ser do material brilhante que Alice tinha visto a princípio, mas a parede a que ela já tinha se acostumado ainda estava lá, atravessando o chão de lado a lado, com as duas fendas no meio. Do outro lado da sala estava uma grande tela com um brilho esverdeado. "Esta é uma tela fluorescente", murmurou o Mecânico para Alice. "Ela emite um flash de luz toda vez que um elétron a atinge, assim, podemos usá-la para detectar onde eles estão."

Do outro lado, onde antes estava a metralhadora, havia outra arma. Esta era pequenininha, parecida com uma versão reduzida daqueles canhões de onde são disparados os homens-bala nos espetáculos de circo. "O que é isso?", Alice perguntou.

"É um canhão de elétrons, é claro." Olhando com mais cuidado, Alice viu uma escadinha que levava à boca do canhão, com uma fila de elétrons esperando a sua vez de serem disparados. Eles estavam bem menores desde a última vez em que os vira. "Mas é claro", ela disse para si mesma, "estes são apenas elétrons pensados."

Ao olhar para eles, ela se surpreendeu ao vê-los acenando para ela. "Como será que eles me conhecem?", ela se perguntou. "Devem ser todos o mesmo elétron que eu conheci antes!"

"Iniciar disparos!", comandou o Mecânico Quântico, e os elétrons subiram os degraus depressa, entraram no canhão e eram disparados, num fluxo regular. Alice não conseguia vê-los atravessar a sala, mas via um clarão de luz no lugar onde cada um deles atingia a tela. Os clarões, ao se apagarem, deixavam uma estrelinha brilhante que ficava marcando o lugar onde os elétrons tinham aterrissado.

Assim como a metralhadora de antes, o canhão de elétrons continuou a disparar a corrente de elétrons e um monte de estrelinhas começou a se agrupar, começando a indicar uma distribuição reconhecível. A princípio, Alice não tinha certeza do que estava vendo, mas quando o número de estrelinhas começou a aumentar, ficou claro que sua distribuição era bem diferente daquela obtida com as pilhas de balas da experiência anterior.

Em vez de uma queda lenta e progressiva a partir de um número máximo no centro, em direção às laterais, as estrelas estavam distribuídas em bandas, com espaços negros entre elas, onde havia poucas ou nenhuma estrela. Alice percebeu que, de certa forma, esse caso era parecido com o das ondas de água, onde há regiões de alta atividade com áreas calmas intercaladas. Agora, havia regiões onde muitos elétrons tinham sido detectados, com muito poucos deles nas áreas intermediárias. Por causa disso, Alice não ficou surpresa quando o Mecânico Quântico disse, "O que você está vendo aí é o claro efeito da interferência. Com as ondas de água, tínhamos regiões de maior e menor movimento na superfície. Aqui, cada elétron será detectado em apenas uma posição, mas a probabilidade de detectar um elétron varia de uma posição para outra. A distribuição de diferentes intensidades de onda que você viu antes foi substituída por uma distribuição de probabilidades. Com um ou dois elétrons tal distribuição não é óbvia, mas usando um monte de elétrons, você vai encontrar mais deles nas regiões de alta probabilidade. Com apenas uma abertura, veríamos que a distribuição decresceria aos poucos em direção aos lados, assim como as balas e as ondas de água se comportaram quando havia só uma fenda. Neste caso vemos que, quando há duas fendas, as amplitudes das duas interferem uma na outra, produzindo picos e depressões óbvias na distribuição de probabilidade. O comportamento dos elétrons é muito diferente do das balas do meu amigo."

"Não estou entendendo," disse Alice, e essa pareceu a única coisa que dizia na vida. "Quer dizer que há tantos elétrons que, de algum jeito, os elétrons que passam por um buraco estão interferindo com aqueles que atravessam o outro buraco?"

"Não. Não é isso que eu quero dizer. Não mesmo. Você verá agora o que acontece quando disparamos somente um elétron." Ele bateu palmas e disse "Ok, vamos fazer de novo, mas devagar, desta vez." Os elétrons entraram em ação ou, para ser mais preciso, um deles entrou no canhão e foi disparado. Os outros continuaram sentados onde estavam. Pouco depois, outro elétron subiu até a boca do canhão e foi disparado também. Continuaram assim por algum tempo, até que Alice começou a

perceber o mesmo padrão de agrupamentos e intervalos vazios aparecendo. Esses agrupamentos e intervalos não eram tão claros como antes porque a baixa intensidade com que os elétrons iam chegando fazia com que não houvesse muitos deles nos agrupamentos, mas ainda assim o padrão era bem claro. "Aí está. Está vendo que o efeito da interferência funciona mesmo quando há apenas um elétron presente de cada vez? Um elétron sozinho pode exibir interferência. Ele pode atravessar ambas as aberturas e interferir consigo mesmo, por assim dizer."

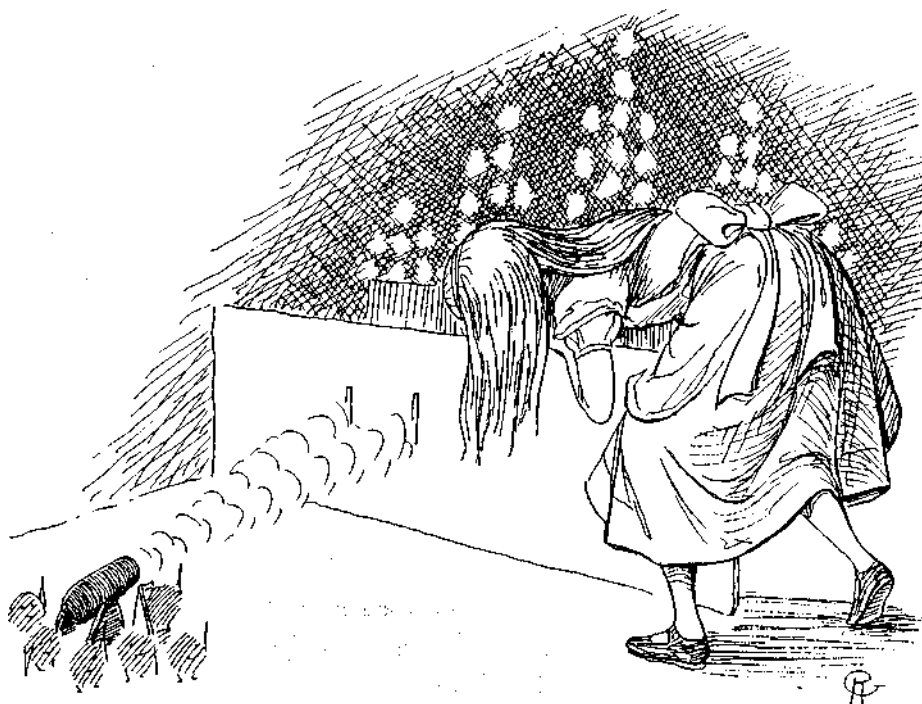
A evidência experimental mais forte do comportamento quântico é fornecida pelo fenômeno da interferência. Quando um resultado pode ser obtido por uma série de maneiras, há uma amplitude para cada maneira possível. Depois, se estas amplitudes são juntadas umas com as outras, podem se somar ou subtrair e a distribuição total de probabilidades mostrará máximos e mínimos distintos: bandas intensas e bandas vazias que se alternam. Na prática, esse efeito tem sido sempre observado onde se espera encontrá-lo. É uma forma de interferência que produz os diferentes conjuntos de estados de energia que ocorrem nos átomos. Apenas aqueles estados que "se adequam perfeitamente" ao potencial vão interferir positivamente para atingir um máximo elevado na probabilidade. Quaisquer outros estados se cancelariam mutuamente, e, portanto, não existem.

"Mas isso é besteira!", exclamou Alice. "Um elétron não pode atravessar as duas aberturas. Como disse o Mecânico Clássico, não faz o menor sentido." Ela foi até a barreira e a examinou mais de perto para tentar ver por onde os elétrons passavam ao atravessar a barreira. Infelizmente, a luz era muito fraca e os elétrons se moviam com tamanha rapidez que ela nunca conseguia distinguir por que abertura eles passavam. "Isso é ridículo", ela pensou. "Preciso de mais luz." Alice tinha esquecido que estava num "quarto pensante" e se surpreendeu quando um holofote fortíssimo apoiado num tripé apareceu ao lado do seu cotovelo. Ela rapidamente dirigiu o fecho de luz para as duas aberturas e ficou satisfeita ao perceber que havia um flash visível perto de uma ou outra abertura quando o elétron passava. "Consegui!", ela gritou. "Consigo

ver os elétrons passarem pelas frestas e é exatamente como eu disse. Cada um deles passa por somente uma abertura."

"Aha!", respondeu empolgado o Mecânico Quântico. "Mas você viu o que aconteceu com o padrão de interferência?" Alice virou-se para olhar para a parede atrás da barreira e se espantou ao ver que agora a distribuição de estrelinhas concentrava-se ao máximo no centro e ia suavemente decaindo para os lados, exatamente como a distribuição clássica das balas. Não era justo.

"É sempre assim e não há nada que possamos fazer", disse o Mecânico Quântico, consolando-a. "Quando não há observação para saber por qual fenda os elétrons passam, ocorre a interferência entre os efeitos das duas fendas. Se você observar os elétrons, verá que, de fato, eles estão em um lugar ou outro e não em ambos mas, neste caso, eles se comportam como o esperado, isto é, como se tivessem passado por apenas uma fenda, não causando interferência. O problema é que não há uma maneira de se observar os elétrons sem perturbá-los, como quando você pôs a luz sobre eles. O simples ato de observar força os elétrons a escolher um percurso. Não importa se você anota por qual buraco cada elétron passou. Não importa se você presta atenção ou não nos buracos. Qualquer observação que pudesse lhe dizer isso, perturba os elétrons e interrompe a interferência. Os efeitos da interferência só acontecem quando não há maneira de saber por qual fenda o elétron passou. Se você sabe ou não, isso não importa.



"É assim: quando há interferência, parece que cada elétron está atravessando ambas as fendas. Se tentar averiguar, verá que cada um dos elétrons só passa por uma fenda, mas então o efeito de interferência desaparece. Não há como escapar disso!"

Alice dedicou um pouco de reflexão ao assunto. "Isso é totalmente ridículo!", concluiu.

"Certamente", respondeu o Mecânico Quântico com um sorriso satisfeito. "Totalmente ridículo, eu concordo, mas é assim que a Natureza funciona e nós temos de acompanhá-la e quer dizer complementaridade:", Alice perguntou.

"Claro. Complementaridade quer dizer que há certas coisas que não se pode saber. Não ao mesmo tempo, pelo menos."

"Não é isso que complementaridade quer dizer", ela protestou.

"Quando eu digo, é isso que quer dizer", respondeu o Mecânico. "As palavras significam aquilo, que eu quiser. É tudo uma questão de quem é

o mestre. Complementaridade, é o que eu digo."

"Você já disse isso", disse Alice, sem se deixar convencer totalmente pela última afirmação do Mecânico.

"Não, não disse", respondeu o Mecânico. "Desta vez quero dizer que há perguntas que não se pode fazer a uma partícula, tais como onde ela está e a que velocidade se move. Na verdade, não significa muita coisa falar de um elétron ocupando uma determinada posição."

"Isso é muita coisa para dizer com uma só palavra!", Alice disse com ironia.

"Com certeza", respondeu o Mecânico, "mas quando faço uma palavra trabalhar horas extras como agora, eu sempre pago mais. Acho que não posso explicar o que está acontecendo de verdade com os elétrons. É normalmente exigido de uma explicação que ela faça sentido com termos e palavras que você já conhece e a física quântica não faz isso. Parece que não faz sentido, mas funciona. Dá até para dizer com segurança que ninguém entende a física quântica. Não consigo explicar para você mas posso descrever o que está acontecendo. Venha para o quarto dos fundos e eu verei o que posso fazer." Ver nota 2 no final do Capítulo.

Na mecânica quântica, partículas são como ondas e ondas são como partículas. Elas são a mesma coisa. Tanto os elétrons quanto a luz exibem os efeitos da interferência, mas, quando detectados, são percebidos como quanta individuais e cada um é observado em um lugar determinado.

A interferência entre os possíveis percursos que uma partícula pode percorrer resultará em uma distribuição de probabilidades com mínimos e máximos bem

pronunciados, onde é mais provável que uma partícula seja detectada em uma posição do que em outra.

Eles deixaram a sala de gedanken, cujo chão tinha voltado ao seu costumeiro aspecto brilhante, e prosseguiram por um corredor até outra sala mobiliada com umas poucas poltronas. Quando os dois já tinham se sentado, o Mecânico continuou: "Quando falamos de uma situação como os elétrons passando pelas aberturas, nós a descrevemos usando uma amplitude. É mais ou menos como as ondas que você viu, e é de fato chamada, com freqüência, de função de onda. A amplitude pode passar por duas aberturas ao mesmo tempo e não é sempre positiva, como a probabilidade. A menor probabilidade que se pode ter é zero, mas a amplitude pode ser positiva ou negativa, com os diferentes percursos podendo se anular ou somar-se uns com os outros e resultar em interferência, como ocorre com as ondas de água."

"Onde estão as partículas então?", perguntou Alice. "Por qual abertura elas passam, na verdade?"

"Na verdade, a amplitude não diz isso. Contudo, se elevamos a amplitude ao quadrado, isto é, se a multiplicarmos por ela mesmo para que sempre dê um número positivo, pode-se obter uma distribuição de probabilidades. Se você escolher qualquer posição determinada, é esta distribuição que vai dizer a probabilidade de, ao se observar uma partícula, achá-la naquela posição."

"E isso é tudo que ela diz?", exclamou Alice. "Devo dizer que me parece insuficiente. Nunca se sabe onde alguma coisa estará."

"Sim, isso é verdade. Não se pode dizer onde uma partícula estará, com exceção de que não estará onde a probabilidade é zero, é claro. Se você tiver um grande número de partículas, porém, pode ter certeza de que encontrará mais partículas onde a probabilidade é mais alta e muito menos delas onde a probabilidade é baixa. Se você tiver um número muito grande de partículas, é possível dizer com bastante precisão o lugar onde tantas partículas estarão. Este é o caso daqueles operários de quem você estava falando. Eles sabiam o que iam construir porque estavam usando um número muito grande de tijolos. Para números muito altos, a

confiabilidade geral do sistema é muito boa." Ver nota 3 no final do Capítulo

"E não há maneira de dizer o que uma partícula está fazendo sem observá-la?", repetiu Alice, só para ter certeza.

"Não, de jeito nenhum. Quando aquilo que você observa pode acontecer de várias maneiras diferentes, você tem uma amplitude para cada maneira possível, e a amplitude geral é obtida adicionando-se todas elas. Você terá então uma superposição de estados. De certa forma, a partícula está fazendo tudo que é possível a ela. Não é só que você não sabe o que a partícula está fazendo. A interferência mostra que as probabilidades estão todas presentes e influenciam umas as outras. De certa forma, são todas igualmente reais. Tudo que não é proibido é compulsório." "Eu vi um cartaz que dizia isso no Banco. Parecia muito sério."

"E é! Essa é uma das regras mais importantes por aqui. Onde várias coisas podem acontecer, elas acontecem. Dê uma olhada no Gato, por exemplo."

"Que gato?", perguntou Alice, olhando em volta, confusa.

"Ora, o Gato de Schrödinger aqui. Ele o deixou conosco para que cuidássemos dele."

Alice olhou para onde o Mecânico apontava e viu um grande gato listrado que dormia numa cesta num dos cantos da sala. Como se despertado por ter ouvido seu nome, o gato se levantou, espreguiçando-se. Ou melhor, levantou-se e não se levantou, espreguiçou-se e não se espreguiçou. Alice viu que, além da figura levemente difusa do gato de costas arqueadas, havia também um gato idêntico, que ainda dormia no fundo da cesta. Ele estava muito rígido, numa posição muito pouco natural. Olhando para ele, Alice poderia jurar que ele estava morto.



"Schrödinger desenvolveu um experimento Gedanken em que um pobre gato ficava preso numa caixa, junto com um recipiente de gás venenoso e um mecanismo que quebraria o frasco caso uma amostra de um material radioativo viesse sofrer um decaimento. Tal decaimento é definitivamente um processo quântico. O material pode ou não decair e então, de acordo com as regras da física quântica, haveria uma superposição de estados, onde em alguns o decaimento teria ocorrido e em outros, não. É claro que, naqueles estados em que o decaimento ocorresse, o gato morreria, e nós então teríamos uma superposição de estados de gato, alguns mortos e alguns vivos. Quando a caixa fosse aberta, alguém observaria o gato e dali em diante ele estaria morto ou vivo. A questão proposta por Schrödinger era: "Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta?"

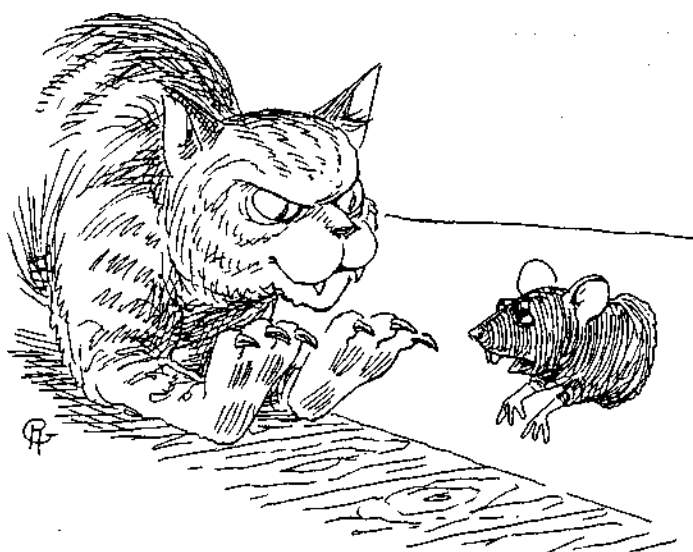
"E o que aconteceu quando abriram a caixa?", Alice perguntou.

"Na verdade, todos estavam tão empolgados discutindo a questão que ninguém abriu a caixa, e é por isso que o Gato ficou assim."

Alice olhou para a cesta onde um aspecto do Gato lambia a si mesmo com dedicação. "Ele parece estar bem vivo", ela observou. Mal as palavras tinham saído de sua boca, o Gato ficou bem sólido e palpável e a versão morta desapareceu. Ronronando satisfeito, o Gato pulou para fora da caixa e começou a perseguir um rato que tinha saído da parede. Alice percebeu que não havia um buraco de rato que ela pudesse ver — o

rato tinha simplesmente saído direto da parede. O Mecânico Quântico seguiu a direção do olhar de Alice. "Ah, sim. Isto é um exemplo da penetração em barreiras: acontece o tempo todo por aqui. Onde houver uma região que uma partícula não puder adentrar de acordo com as leis da mecânica clássica, a amplitude não necessariamente cessa de imediato na fronteira da região, apesar de diminuir rapidamente dentro dela. Se a região for bem estreita, ainda haverá alguma amplitude sobrando do outro lado, e isso dá margem a uma pequena probabilidade para que a partícula possa aparecer ali, tendo aparentemente atravessado uma barreira aparentemente intransponível, um processo chamado de 'tunelamento'. Acontece com frequência."

Alice estava repassando em sua cabeça as coisas que tinha visto até então e percebeu uma dificuldade. "Como foi que eu consegui observar o Gato e fixar sua condição se ele não pôde fazer isso por si próprio? O que é que decide que uma observação foi mesmo realizada e quem está capacitado para fazê-las?"



"Essa é uma pergunta muito boa", respondeu o Mecânico Quântico, "mas nós somos apenas mecânicos e por isso não nos importamos muito com essas coisas. Apenas fazemos o trabalho e usamos métodos que sabemos que funcionarão na prática. Se quer alguém para discutir o problema da medida com você, terá de ir a algum lugar mais acadêmico. Sugiro que assista a uma aula da Escola de Copenhague."

"E o que faço para chegar lá?", Alice perguntou, conformando-se com o fato de ter sido passada adiante para mais outro lugar. Em resposta, o Mecânico a levou pelo corredor e abriu uma porta, que não dava para o beco por onde ela tinha entrado, mas sim para um bosque.

Notas

1. A mecânica quântica é normalmente contrastada com a mecânica clássica ou newtoniana. Esta última, que se ocupa da descrição detalhada de objetos em movimento, foi desenvolvida antes dos primeiros anos do século 20 e se baseia nos trabalhos originais de Galileu, Newton e outros antes e depois deles. A mecânica newtoniana funciona muito bem em grandes escalas. O movimento dos planetas pode ser previsto com muita antecedência e grande precisão. Ela funciona quase igualmente bem para planetas artificiais e missões espaciais de exploração: suas posições podem ser previstas anos antes. Funciona muito bem também para maçãs caindo de árvores.

No caso de uma maçã que cai, a resistência do ar que a cerca será significativa. A mecânica clássica descreve o fato como a colisão de um número enorme de moléculas de ar ricocheteando na maçã. Quando você pergunta sobre as moléculas de ar, respondem-lhe que elas são pequenos grupos de átomos.

Quando você pergunta sobre os átomos, faz-se um silêncio constrangedor.

A mecânica clássica não foi bem-sucedida ao tentar explicar a natureza do mundo em escala atômica. As coisas devem ser diferentes de alguma maneira para objetos pequenos do que parecem ser para objetos grandes. Para usar estes argumentos, você deve perguntar: pequenos ou grandes em relação a quê? Deve haver alguma dimensão, uma constante fundamental que fixe a escala em que este novo comportamento se torna óbvio. É uma mudança definitiva na maneira com que se

observa o comportamento das coisas, e ela é universal.

Átomos no sol e em estrelas distantes emitem luz no mesmo espectro que o abajur na sua mesa-de-cabeceira. A passagem para o comportamento quântico não é algo que acontece apenas localmente; há alguma propriedade fundamental da Natureza envolvida. Esta propriedade é denotada pela constante universal que aparece na maioria das equações quânticas. O mundo é granulado na escala definida por esta constante CHARACTER. Nessa escala, energia e tempo, posição e momentum, apresentam-se borrados entre si. Nem é preciso dizer que, na escala da percepção humana, CHARACTER é muitíssimo pequena e a maioria dos efeitos quânticos não é absolutamente evidente.

2. O que as relações de incerteza de Heisenberg nos dizem é que vemos as coisas de modo errado. Cremos de antemão que devemos ser capazes de medir a posição e o momentum de uma partícula ao mesmo tempo, mas descobrimos que não podemos. A própria natureza das partículas não permite que façamos tais medições sobre elas e a teoria nos diz que estamos fazendo as perguntas erradas, perguntas para as quais não temos respostas viáveis. Niels Bohr usou a palavra complementaridade para expressar o fato de que é possível haver conceitos que não podem ser precisamente definidos ao mesmo tempo: pares de conceitos tais como justiça e legalidade, emoção e racionalidade.

Há algo fundamentalmente errado com a nossa crença de que deveríamos ser capazes de falar da posição e do momentum, ou da quantidade exata de energia de uma partícula num instante determinado. Não se sabe bem por que deveria ser significativo falar ao mesmo tempo de duas qualidades tão distintas.

Parece que não é tão significativo assim.

3. A mecânica quântica não se refere a partículas definidas no sentido tradicional clássico; em vez disso, trata de estados e amplitudes. Se você eleva ao quadrado uma amplitude (i.e. multiplica por seu próprio valor), você obtém uma distribuição de probabilidades que dá a probabilidade de se obter vários resultados ao se fazer uma observação ou medição. O valor real que se obtém com qualquer medição parece ser aleatório e imprevisível. Acaba parecendo que a sugestão feita mais cedo neste livro de que a Natureza é incerta e de que "vale tudo" deve, no final das contas, ser verdade. Não parece?

Bem... não. Se você faz muitas medições, o resultado médio pode ser previsto com precisão. Anotadores de apostas não sabem que cavalo ganhará cada corrida, mas esperam confiantes fazer algum lucro até o final do dia. Não conseguem prever grandes e inesperadas perdas, pois trabalham com números pequenos cuja média não pode ser confiável. O número de apostadores seria de alguns poucos milhares, em vez dos 1.000.000.000.000.000.000.000 átomos, ou mais, existentes mesmo em um ínfimo pedaço de matéria. Estes dígitos parecem menos com um número do que com o desenho repetitivo de um papel de parede, mas é inegavelmente grande. As flutuações estatísticas médias esperadas em medições com números de átomos tão extensos são desprezíveis, mesmo que o resultado para átomos individuais possa ser bastante aleatório.

Amplitudes da mecânica quântica podem ser calculadas com bastante precisão e comparadas com experimentos. Um resultado muito citado é o do momento magnético de um elétron. Os elétrons giram como pequenos peões e têm propriedades elétricas: eles se comportam como pequenos ímãs. A força magnética e a rotação do elétron estão relacionadas, e esta razão pode ser calculada com o uso das unidades apropriadas.

Um cálculo clássico chega ao resultado 1 (com suposições arbitrárias sobre a distribuição da carga elétrica de um elétron).

O cálculo clássico chega ao resultado $2.0023193048 (\pm 8)$ (o erro está na última casa decimal).

Uma medição chega ao resultado $2.0023193048 (\pm 4)$.

E uma ótima concordância! A probabilidade de se conseguir, ao acaso, valores tão concordantes é similar à probabilidade de se jogar um dardo, também ao acaso, e acertar na mosca — quando o alvo está tão longe quanto a Lua. Esse resultado em particular é freqüentemente dado como exemplo do sucesso da teoria quântica. É possível calcular, com a mesma precisão, as amplitudes de outros processos, mas são muito poucos os valores que podem ser medidos com essa precisão

