

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS**

JACKSON KAMPHORST LEAL DA SILVA

**UMA PROPOSTA DE ENSINO DE TÓPICOS DE MECÂNICA
QUÂNTICA SOB A ÓTICA DE BACHELARD.**

**Bagé
Agosto, 2015.**

JACKSON KAMPHORST LEAL DA SILVA

**UMA PROPOSTA DE ENSINO DE TÓPICOS DE MECÂNICA
QUÂNTICA SOB A ÓTICA DE BACHELARD.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ensino de Ciências da Fundação Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Luiz Nedel.

**Bagé
Agosto, 2015.**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S586p Silva, Jackson Kamphorst Leal da Silva
UMA PROPOSTA DE ENSINO DE TÓPICOS DE MECÂNICA QUÂNTICA SOB
A ÓTICA DE BACHELARD. / Jackson Kamphorst Leal da Silva Silva.
142 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS, 2015.

"Orientação: Daniel Luiz Nedel Nedel".

1. Mecânica Quântica. 2. Dualidade onda-partícula. 3.
Interpretações da Mecânica Quântica. 4. Obstáculos
Epistemológicos. 5. Racionalismo Aplicado. I. Título.

JACKSON KAMPHORST LEAL DA SILVA

**UMA PROPOSTA DE ENSINO DE TÓPICOS DE MECÂNICA
QUÂNTICA SOB A ÓTICA DE BACHELARD**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências.

Área de concentração: Ensino de Ciências

Dissertação defendida e aprovada em: 31 de julho de 2015

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Daniel Luiz Nedel
Orientador
UNIPAMPA



Dr. Maurizio Ruzzi
IBM Brasil



Profa. Dra. Vania Elisabeth Barlette
UNIPAMPA

Dedico esta dissertação à minha mãe Veda Lucinda Leal da Silva (in memoriam), aos meus irmãos Jafferson Kamphorst Leal da Silva e Jennifer Kamphorst Leal da Silva e a meus filhos Pedro Peuckert Kamphorst Leal da Silva e Marcela Peuckert Kamphorst Leal da Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe (in memoriam) pela inspiração e pelo exemplo de pessoa e professora.

Agradeço aos meus filhos por darem sentido à minha existência.

Agradeço à mãe dos meus filhos, Sandra Rejane da Silva Peuckert, por possibilitar essa existência.

Agradeço aos meus irmãos por favorecerem, de todos os modos, a conclusão dessa dissertação.

Agradeço ao nosso grupo de pesquisa, professor Daniel (coordenador), José Ciriaco (mestrando), Felipe Lima e Giovanni Del Duca (estudantes da graduação), pelas colaborações no nosso estudo sobre a Epistemologia de Bachelard e pela pesquisa sobre os obstáculos epistemológicos presentes nos livros didáticos. Em particular agradeço ao Felipe e ao Giovanni pelo empréstimo de suas juventudes.

Agradeço a todos os professores do curso pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos.

Agradeço aos membros da banca pelas devidas e necessárias correções e pelas importantes sugestões que vieram enriquecer esse trabalho.

Por fim agradeço ao Professor Doutor Daniel Luiz Nedel pela orientação e pela colaboração que possibilitaram essa dissertação.

Muito obrigado!

RESUMO

Dada a complexidade da representação do mundo microscópico e a necessária capacidade de abstração exigida na sua representação contemporânea, pretendemos com este trabalho identificar possíveis obstáculos epistemológicos que influenciaram a construção e o desenvolvimento histórico da Mecânica Quântica, bem como identificar os obstáculos epistemológicos presentes nos textos de Física Moderna e Contemporânea dos livros didáticos. Destacando as rupturas epistemológicas como uma descontinuidade que ocorre no desenvolvimento histórico e também como uma inadequação entre o saber comum e o conhecimento científico e através de uma psicanálise do conhecimento objetivo utilizada na superação dos obstáculos epistemológicos e na retificação dos erros das concepções alternativas dos alunos, pretendemos desenvolver uma sequência didática através de uma visão filosófica não realista e elaborar textos de apoio para o estudo da questão da dualidade onda-partícula através do experimento da fenda dupla para elétrons, do interferômetro Mach-Zehnder e da interação entre radiação e matéria através do efeito fotoelétrico sob a luz do postulado quântico, que são questões essenciais da Física Quântica, destacando, ainda, que na Física Quântica a observação dos fenômenos está relacionada com o fato de que a interação dos objetos atômicos e dos instrumentos de medida é parte integrante dos fenômenos quânticos (Interpretação da Complementaridade). Considerando que abordagens filosóficas, de caráter ontológico e epistemológico, podem gerar estratégias e atividades que envolvam a imaginação e a abstração necessárias para o entendimento das novas teorias incluímos neste trabalho uma breve discussão sobre o realismo científico e o antirrealismo bem como um breve relato histórico deste debate filosófico, que podem e devem ser conduzidos às salas de aula. Utilizaremos como fundamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho a Epistemologia Histórica de Bachelard.

Palavras-chave: Mecânica Quântica. Dualidade onda-partícula. Obstáculos epistemológicos. Conhecimento.

ABSTRACT

Considering the complexity of the microscopic world representation and the abstraction needed for a nowadays representation, we identify in this work (i) possible epistemological obstacles that influenced the construction and the historical development of Quantum Mechanics and (ii) some epistemological obstacles existing in the textbooks of Modern Physics. We characterize the epistemological ruptures as a discontinuity occurring in the historical development and also as an inadequacy between the common knowledge and the scientific one. Using a psychoanalysis in the objective knowledge that was used in the overcoming of the epistemological obstacles and in the correction of the alternative conceptions of the students, we develop a non realistic teaching sequence and elaborate support texts for the study of the wave-particle duality in (a) the electron double slits experiment, (b) the Mach-Zender interferometer and (c) the matter-radiation interaction in the photoelectric effect. Besides the fact that the wave-particle is an important notion in Quantum Physics, we would like to emphasize that a measure in quantum scale is related to the concept that the interaction of atomic objects with measuring instruments is an integrated part of quantum phenomena (complementary principle). Since ontological and epistemological philosophical approaches can generate strategies and activities involving the imagination and abstraction needed to understand new theories, we present in this work a brief discussion about scientific realism and anti-realism. We also present a short historical description of this philosophical debate that can and should be realized in classroom. Our work is theoretical based in the Historical Epistemology of Bachelard.

Key-words: Quantum Mechanics. Wave-particle duality. Epistemological obstacles. Knowledge.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 ESTUDOS RELACIONADOS	11
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
3.1 EPISTEMOLOGIA HISTÓRICA DE GASTON BACHELARD.....	22
3.2 O RACIONALISMO APLICADO.....	44
3.3 BACHELARD E O REALISMO.....	50
3.4 BACHELARD O PROFESSOR.....	54
4 ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICOS.....	60
4.1 ANÁLISE DOS TEXTO SOBRE DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.....	61
4.2 ANÁLISE DOSTEXTOS SOBRE O PRINCÍPIO DA INCERTEZA.....	67
5 PRODUÇÃO EDUCACIONAL	72
6 METODOLOGIA DE PESQUISA	79
7 ANÁLISE DOS DADOS.....	80
8 CONCLUSÃO.....	86
9 REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A – Texto de apoio sobre Realismo e Antirrealismo.....	93
APÊNDICE B – Texto de apoio sobre a dualidade onda-partícula.....	97
APÊNDICE C– Texto de apoio sobre a interação Radiação e Matéria.....	105
APENDICE D- Questões do teste avaliativo.....	130
ANEXO A – Roteiro exploratório para o interferômetro Mach-Zehnder virtual.....	134

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é a elaboração e a respectiva validação de uma sequência didática com uma visão filosófica não realista e desenvolver textos de apoio sobre a dualidade onda-partícula utilizando a experiência da fenda dupla com elétrons, o interferômetro Mach-Zehnder e a interação entre radiação e matéria através do efeito fotoelétrico sob a luz do postulado quântico (interações discretizadas), bem como, numa atitude conciliatória entre o discurso filosófico e o discurso científico, e considerando que abordagens filosóficas, de caráter ontológico e epistemológico, podem gerar estratégias e atividades que envolvam a imaginação e a abstração necessárias para o entendimento das novas teorias incluímos neste trabalho um texto de apoio para uma breve discussão sobre o realismo científico e o antirrealismo, e um breve relato histórico deste debate filosófico, que podem e devem ser conduzidos às salas de aula.

Como a elaboração desta sequência didática estará fundamentada na Epistemologia Histórica de Bachelard, será necessário, para subsidiar este trabalho, identificar previamente os obstáculos epistemológicos presentes nos textos de física moderna e contemporânea dos livros didáticos, tendo em vista que a análise destes obstáculos epistemológicos contribui para que se superem os obstáculos pedagógicos que impedem os alunos de compreenderem o conhecimento científico e os professores de compreenderem porque o aluno não aprende, bem como contribui para balizar nossa ação pedagógica de modo a não reforçar tais obstáculos.

Na educação, a noção de obstáculo epistemológico também é desconhecida. Acho surpreendente que os professores de ciências, mais do que os outros se possível fosse, não compreendam que alguém não compreenda. Poucos são os que se detiveram na psicologia do erro, da ignorância e irreflexão. (...) os professores de ciência imaginam que o espírito começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos: não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana. (BACHELARD, 2011, p. 23).

A identificação dos obstáculos epistemológicos presentes nos textos de física moderna e contemporânea presentes nos livros didáticos (PNLD 2012 com validade até 2014) será possibilitada pela pesquisa específica que já está em curso por um grupo de pesquisa orientado pelo Professor Doutor Daniel Nedel na Universidade do Pampa (Unipampa), Campus Ba-

gê/RS e pela pesquisa da literatura relacionada ao tema. Corrobora na justificativa desta pesquisa o fato do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), regulamentado pelo Decreto nº 91.542, de 19/8/1985, promover uma extensa avaliação, sem, no entanto, avaliar a presença, nos livros didáticos, de obstáculos epistemológicos, que podem aparecer sob várias formas e prejudicar ou dificultar a aprendizagem dos conteúdos pelos alunos.

Tudo isto posto, e considerando que a aprendizagem de um novo conhecimento é um processo de mudança de cultura, sendo necessária a superação dos obstáculos epistemológicos existentes nos conhecimentos prévios dos alunos e a necessária catarse intelectual e afetiva, capaz de psicanalisar o conhecimento objetivo do educando e, também, do professor, elevando seus estados de consciência, bem como, capaz de psicanalisar o conhecimento objetivo ensinado, retirando do conhecimento objetivo todo caráter subjetivo e destacando a influência dos valores inconscientes na própria base do conhecimento empírico e científico, parte-se para a elaboração da sequência didática e dos textos de apoio.

A validação e possíveis correções poderão ser efetivadas após aplicação de um teste e a respectiva análise dos resultados.

Para conscientizar os alunos de que a ciência *sofre* constantes mudanças e retifica seus erros, destacando que a ciência moderna e contemporânea exige alto grau de abstração e matematização, visto que nelas estão cada vez mais presentes conceitos abstratos e que o sujeito da ciência é aquele que luta contra as más imagens e busca produzir ações que transformem a realidade social, dado que o possível não é o que existe naturalmente, mas que certamente poderá ser produzido artificialmente. Para conscientizar os alunos que as probabilidades que a física quântica utiliza são intrínsecas, no sentido em que não são devidas à nossa ignorância de eventuais mecanismos subjacentes e que tal indeterminismo só surge quando se estabelece uma conexão entre as equações da física quântica e os fatos experimentais, recontextualizando a ciência ensinada com as novas tecnologias. Para efetivamente inserir a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, ressaltando a dimensão cultural e filosófica da física para além do conteúdo específico, respaldado pelas propostas de reforma do Ensino Médio presentes nas DCNEM, PCN e PCN+, este trabalho é proposto e justificado.

2 ESTUDOS RELACIONADOS

Na pesquisa bibliográfica dos estudos relacionados com o tema deste projeto realizamos uma busca por artigos científicos com foco em questões relacionadas ao Ensino de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio consultando alguns dos principais periódicos em versão digital. Esta busca foi facilitada e direcionada por dois trabalhos específicos de revisão bibliográfica sobre este mesmo tema: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A ÁREA DE PESQUISA “FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO” cujos autores, Fernanda Ostermann e Marco Antônio Moreira, são pesquisadores do Instituto de Física da Universidade federal do Rio Grande Do Sul, publicado na revista *Investigações em Ensino de Ciências –V5(1), pp.23-48, 2000*; FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: O QUEDIZEM AS PESQUISAS, cujos autores, André Coelho da Silva e Maria José Pereira Monteiro de Almeida, são pesquisadores do Grupo de estudo e pesquisa em Ensino de Ciência da Universidade Faculdade de Educação, Unicamp, Campinas, SP, publicado na revista *Cad. Bras. Ens. Fís., v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez. 2011*.

Os trabalhos encontrados e analisados por Ostermann e Moreira (2000) foram classificados em seis grupos considerando os seguintes aspectos:

- Justificativas para a inserção de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio;
- Questões metodológicas, epistemológicas, históricas referentes ao ensino de FMC; estratégias de ensino e currículos;
- Concepções alternativas dos estudantes acerca de tópicos de FMC;
- Temas de FMC apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores de nível médio;
- Propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem;
- Livros didáticos de nível médio que inserem temas de FMC.

Moreira e Ostermann destacam que existe uma grande concentração de publicações que apresentam temas de física Moderna e Contemporânea, em forma de divulgação, ou como bibliografia de consulta para professores de ensino médio e uma escassez de trabalhos sobre concepções alternativas de estudantes acerca de tópicos de Física Moderna e Contemporânea, bem como de pesquisas que relatam propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem.

Dos trabalhos incluídos no **grupo das “Concepções alternativas dos estudantes acerca de tópicos de FMC”**, os autores concluem que o número de publicações que tratam deste tema ainda é pequeno, e, em geral, estas foram associadas aos erros conceituais dos livros-texto e de informações veiculadas pela mídia.

Aqui destacamos o trabalho de Paulo (1997) sobre as concepções alternativas de alunos do ensino médio referentes à natureza da luz e à estrutura do átomo, no qual encontrou resultados tais como:

- A luz para a maioria dos alunos é constituída por raios luminosos, por “varetas rígidas e finas”;

- É predominante a concepção de que, no átomo, o formato das camadas eletrônicas é elíptico ou circular, que estas camadas constituem apenas um método de se compreender melhor o átomo, não correspondendo a uma realidade física e que não há qualquer conexão entre a emissão/absorção de luz e mudança de orbital por parte do elétron.

Também merece destaque o trabalho Solbes et al. (1987b), sobre a introdução dos modelos quânticos na escola e no 1º ano universitário, na Espanha. Neste trabalho os autores analisaram 56 livros-texto e concluíram que esta introdução ocorre de forma incorreta, visto que na abordagem do efeito fotoelétrico não é destacado a ruptura com a Física Clássica e a dualidade onda-partícula, continua sendo encarada como proveniente de algumas deficiências técnicas, sendo, portanto, fontes importantes das concepções alternativas que os alunos possuem.

No grupo **“Propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem”** foram incluídos onze trabalhos, dos quais nove direcionados à Mecânica Quântica, um sobre armas nucleares e outro sobre raios cósmicos.

Destacaremos alguns trabalhos sobre Mecânica Quântica.

Um dos últimos trabalhos do grupo de Gil e Solbes direcionado ao ensino de conceitos básico da Quântica se refere à aplicação de um programa completo de atividades com 180 alunos entre 16 e 18 anos, no qual utilizaram como referencial um modelo construtivista de ensino-aprendizagem na perspectiva da mudança conceitual e metodológica. Relatam os autores que foi possível obter os seguintes resultados:

- Apenas de 8 a 30% dos alunos, ao final do curso, ainda ignoravam a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica;

- Somente um terço dos alunos apresentava ainda concepções alternativas sobre dualidade onda-partícula, princípio da incerteza.

Os autores concluem, colocando que:

- Professores de ensino médio e livros-texto transmitem uma imagem incorreta sobre ciência que ignora a existência de uma crise e mudanças de paradigmas;

- Como resultado desta orientação, os alunos desenvolvem ideias confusas sobre a evolução do desenvolvimento científico e apresentam sérias concepções alternativas sobre tópicos de Física Moderna;

- É relativamente fácil dar uma visão mais correta da Física através de uma abordagem construtivista que leve os alunos a uma mudança conceitual semelhante à mudança histórica do paradigma.

O trabalho de Fischler e Lichtfeldt (1992), uma estrutura didática, foi aplicado a um grupo de 270 alunos, dos quais 150 alunos constituíam o grupo experimental e 120, o grupo de controle. Tanto o grupo experimental como o grupo de controle responderam aos mesmos questionários antes e depois das aulas.

Segundo estes autores os dois grupos tendiam a apresentar a mesma concepção com respeito à estabilidade do átomo: os elétrons estão em círculos em torno do núcleo com as forças centrífugas e coulombianas em equilíbrio.

Após as aulas da unidade de ensino 68% dos estudantes do grupo experimental relacionaram a estabilidade atômica ao princípio de incerteza de Heisenberg, em contraposição a 7% do grupo de controle.

Cuppari et al. (1997) introduziram alguns aspectos da Mecânica Quântica em uma escola de Torino (Itália) no 3º ano partindo de uma atividade de laboratório na qual diferentes tipos de movimentos foram estudados e representados não só com os diagramas usuais mas também nas coordenadas espaço de fase.

Após o estudo teórico destes movimentos, incluindo a análise de energia, foi definido o conceito quântico de “ação”, entendendo sua dimensão e ordem de magnitude em diferentes movimentos macroscópicos. A constante de Planck foi, finalmente, introduzida de uma maneira qualitativa.

Esta atividade foi realizada em 12 horas aulas e um teste de escolha múltipla foi respondido permitindo aos autores concluir que não há dificuldades maiores para os estudantes se familiarizarem com o conceito de ação e com a constante de Planck.

Pinto e Zanetic (1999) desenvolveram uma experiência sobre a inserção da natureza quântica da luz em uma escola de nível médio de São Paulo. **Utilizaram como referencial**

filosófico a noção de perfil epistemológico de Gaston Bachelard. Foram ministradas 12 horas aulas que permitiram resgatar o interesse do estudo da Física para um grande número de alunos. Quanto à aprendizagem dos conceitos envolvidos, os autores consideraram que há muitas questões a responder, mas que a experiência que tiveram mostrou que é possível levar a Física Quântica para o ensino médio.

Estes trabalhos sobre tópicos de Mecânica Quântica no ensino médio, com seus resultados de aprendizagem, mostram:

(...) a possibilidade de êxito na inserção de temas mais atuais nos currículos das escolas. Se por um lado, de certa forma, há um consenso em torno dos aspectos quânticos a serem ensinados, a questão das metodologias representa um ponto de divergência. Em particular, o papel que a Física Clássica desempenha no entendimento de conceitos quânticos é ainda um ponto bastante polêmico (Moreira e Ostermann, 2000). Na pesquisa bibliográfica de Silva e Almeida (2011) os artigos científicos revisados foram classificados em cinco categorias de acordo com os seus objetivos e cada artigo foi alocado em apenas uma das categorias. São elas:

- 1) Revisão da literatura sobre o ensino de FQ/FMC.
- 2) Análise curricular.
- 3) Análise dos conteúdos em livros que abordam FQ/FMC.
- 4) Elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino.
- 5) Concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EMou Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Na categoria “**Elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino**”, na qual a maioria dos artigos revisados forma incluídos, temos propostas que não foram testadas em sala de aula e outras que foram testadas.

Destacando algumas propostas não testadas em sala de aula: Pospiech (1999); Andrade et al (2007); Costa et al (2007); Fanaro et al (2007); Arlego (2008); Johansson e Milsted (2008); Ostermann et al (2009).

O trabalho de Pospiech (1999) procura identificar as principais dificuldades no ensino da teoria quântica e sugere o conceito de spin, através de experimentos mentais, como ponto de partida no ensino da MQ. Segundo este autor uma discussão apenas qualitativa sobre a teoria quântica não seria possível porque os conceitos envolvidos e os termos por nós utilizados foram desenvolvidos a partir de experiências diárias e nossa linguagem só é adequada para descrever objetos físicos concretos. Desta forma, defende a utilização de alguns aparatos

matemáticos de teoria quântica e justifica, neste sentido, o típico fenômeno quântico do spin como porta de entrada para o estudo da teoria quântica por apresentar uma estrutura matemática simples e, também, por permitir uma explicação consistente do Princípio da Incerteza de Heisenberg, bem como provocar discussões acerca de aspectos filosóficos sobre a realidade e a objetividade da natureza.

Na visão do autor, referências a conceitos clássicos devem ser evitadas bem como pensar o spin como algo relacionado a giro. Sugere o uso do termo objeto quântico em vez de onda ou partícula.

Os trabalhos de Andrade et al (2007) e Costa et al (2007), procuraram identificar e explicitar relações entre a FMC e as obras de Salvador Dalí, a fim de que estas possam ser utilizadas como recursos didáticos no nível médio e na formação de professores. A ideia seria atrair os alunos através da arte, em um trabalho interdisciplinar.

A construção de uma proposta estrutural conceitual para ensinar os conceitos fundamentais da MQ através do método de caminhos múltiplos de Feynman está presente tanto no trabalho de Fanaro et al (2007) como no trabalhos de Arlego (2008). Estes autores não seguem a ordem histórica ao apresentar os conceitos da MQ e acreditam que o conceito de fóton não seja a forma mais simples para a apresentação de tais conceitos no nível secundário. Sugerem que a concepção de comportamento dual da matéria seja construída a partir do comportamento corpuscular e analisando a emergência do comportamento ondulatório a partir de simulações da experiência da fenda dupla com partículas de massa cada vez menores e o uso do termo “sistema quântico” em substituição do termo “partícula quântica” que poderia confundir os estudantes, pois este continua enfatizando a ideia de partícula.

Os autores pontuam que a adaptação do formalismo de caminhos múltiplos de Feynman, simplificando a matemática envolvida, aliada ao uso de simulações, pode auxiliar a aprendizagem de fundamentos da MQ no EM e, destacam, ainda, a necessidade de testar tal proposta em sala de aula.

O trabalho de Johansson e Milstead (2008) sugere o Princípio da Incerteza de Heisenberg como ponto de partida para discussão da FQ no nível médio mostrando como este princípio poderia ser demonstrado em sala de aula a partir de uma situação familiar aos alunos em conjunto com o experimento de difração por uma fenda para demonstrar seus efeitos.

Os autores deste trabalho acreditam não ser necessário introduzir o conceito de função de onda de uma partícula e a superposição de estados, bem como a expressão final formal de tal princípio, sendo necessário, apenas, destacar a incerteza da posição e a incerteza do mo-

mento como os limites impostos pela natureza ao nosso conhecimento da posição e do momento de uma partícula.

Ostermann et al (2009) defendem a óptica ondulatória como porta de entrada para o mundo quântico com a discussão dos conceitos de dualidade onda-partícula e da interpretação probabilística da FQ.

Neste trabalho os autores propõem a utilização do interferômetro virtual de Mach-Zehnder como ferramenta didática e cultural, o que possibilitaria evidenciar o comportamento corpuscular ou ondulatório do fóton, sendo possível trabalhar tanto no regime quântico como no regime clássico.

Ostermann et al (2009) destacam neste trabalho que o interferômetro de Mach-Zehnder possui dois divisores de feixes, sendo, portanto, equivalente a uma fenda dupla, mas com a vantagem de não apresentar “ruídos” na operação em regime quântico como a fenda dupla. O “ruído” presente no experimento da fenda dupla em regime quântico, segundo os autores, deve-se as possíveis interações entre o fóton e as paredes e/ou o material da dupla fenda e isto poderia representar obstáculos à aprendizagem. Destacam, ainda, os autores que devido à relação deste aparato com a computação quântica, o mesmo poderia ser utilizado no ensino médio, na modalidade virtual, para o entendimento do princípio básico da computação quântica: a superposição.

- Destacando alguns trabalhos cujas propostas foram testadas em sala de aula:

Cuppari et al (1997); Fanaro et al (2009a); Otero et al (2009); Fanaro et al (2009b); Sales et al (2008); Carvalho Neto et al (2009); Pinto e Zanetic (1999), Olsen (2002); Paulo e Moreira (2004);

O trabalho de Cuppari et al (1997), que descreve uma abordagem para ensinar aspectos da MQ baseado no trabalho de Planck sobre a existência de uma granularidade fundamental no espaço de fase, já foi discutido anteriormente na pesquisa bibliográfica de Moreira e Ostermann (2000).

Fanaro et al (2009a) propõe a introdução da MQ no EM através de uma estrutura conceitual baseada no método da integral da caminho de Feynman com uma abordagem não histórica e um formalismo complementar ao canônico numa linha semelhante aos trabalhos de Fanaro et al (2007) e Arlego (2008). A proposta em questão foi testada em um grupo de estudo constituído por trinta estudantes entre 17 e 18 anos com bom desempenho escolar.

A sequência didática foi composta de treze aulas tendo como fim a explicação da “inesperada” distribuição de elétrons na experiência da dupla fenda. Após à aplicação desta sequência didática foi aplicado um teste com o objetivo de detectar os conhecimentos construídos pelos estudantes. Da análise dos resultados destes testes os autores concluíram que:

- Os estudantes consideraram que o elétron tem um comportamento especial e característico; dos trinta alunos, oito mencionaram explicitamente o termo “sistema quântico”.

- Os alunos não tiveram dificuldade em utilizar a técnica da soma de todas as alternativas de Feynman.

- A maioria dos estudantes não aceitou a impossibilidade de conhecer qual a função que descreve o movimento de um elétron.

- A técnica da soma de todas as alternativas foi considerada pelos estudantes como um mecanismo adequado para explicar o padrão de interferência observado no experimento de fenda dupla.

- Os alunos entenderam que o comportamento ondulatório permite associar um comprimento de onda tanto para partículas macroscópicas quanto para partículas microscópicas.

- Os alunos relacionaram a forma e a detecção do padrão de interferência para os casos macroscópicos e microscópicos.

- Sessenta por cento dos alunos afirmaram que, apesar de o padrão de interferência ser formado, ele nem sempre pode ser visto ou detectado.

- O conceito clássico de caminho foi um obstáculo ao entendimento de caminho estabelecido na sequência didática. Aqui os autores sugerem que a associação entre caminho físico e a imagem de um único e determinístico caminho deve ser evitada.

Para estes autores, no ensino de MQ no EM, é necessário enfatizar a ideia de que a Física não trata da realidade, mas constrói modelos abstratos dentro dos quais percepções já enraizadas são inapropriadas. Destacam, ainda, que apesar desta proposta ser viável, ela é apenas o começo da discussão e que necessita de avaliação dos físicos, pesquisadores em Ensino de Física e professores, a fim de que possam ser respondidas questões como: Quais os obstáculos prévios à conceitualização dos conceitos de MQ? O que poderia ser feito para auxiliar esse processo? Que tipos de interações entre professores e alunos são melhores para apoiar o esforço cognitivo necessário à abordagem desta sequência?

Esta sequência didática elaborada por Fanaro et al (2009a) foi, também, aplicada e analisada por Otero et al (2009) numa turma do último ano do ensino secundário argentino. Sua eficiência e viabilidade foram confirmadas através da análise dos resultados de testes escritos e registros de áudio.

Quase todos os estudantes conseguiram distinguir, em termos da presença de máximos e mínimos, as curvas para bolas e elétrons, relacionando-as com o conceito de distribuição de probabilidade. No que se refere à concepção do elétron como um sistema quântico, afirma os autores, que a maioria dos estudantes reconheceu o comportamento diferente do elétron em relação às partículas macroscópicas, mas alguns alunos consideram o elétron, ainda, como uma partícula acrescida de uma propriedade quântica.

Para os autores a maioria dos alunos parece ter compreendido o princípio da correspondência e o significado da constante de Planck na transição quântico-clássica.

Otero et al (2009) afirmam, também, que na aplicação desta sequência didática os alunos encontraram dificuldades no uso da técnica da soma de todas as alternativas de Feynman, diferentemente do relatado por Fanaro et al (2009a).

No trabalho de Fanaro et al (2009b) é apresentado os resultados da aplicação de parte de uma sequência didática sobre MQ, que começa e termina com o experimento da fenda dupla, a alunos do último nível secundário constituída de trinta alunos entre 17 e 18 anos os quais foram divididos em seis grupos fixos. Para os autores a experiência da fenda dupla permite dar sentido à explicação probabilística que explica seus resultados.

Na análise sobre a viabilidade desta proposta os autores utilizaram produções escritas pelos alunos após cada atividade e ao final da sequência, registro em áudio de atividades em grupo e um teste de opinião sobre esta mesma sequência. Nesta pesquisa os autores adotaram como referencial a teoria dos campos conceituais de Vergnaud.

Por fim, os autores destacam que foi possível observar o caráter oportunista da conceitualização combinado com a presença dos invariantes operatórios construídos durante a história cognitiva dos alunos, com a noção de elétrons como pequenas bolas capazes de atravessar paredes e que tal criação didática deve ser evitada, justamente, por funcionar como obstáculo epistemológico à conceitualização do elétron como sistema quântico.

O trabalho de Sales et al (2008) refere-se à análise dos resultados da aplicação de um objeto de aprendizagem denominado “pato quântico”. Este objeto utiliza a atividade de modelagem exploratória, através de uma metáfora ao efeito fotoelétrico, para estudar este efeito e calcular a constante de Planck. Os autores acreditam que o uso de ambientes computacionais facilitam a aprendizagem e justificam o uso de ferramentas virtuais em FMC pelas dificuldades envolvidas em uma abordagem concreta destes tópicos.

Este estudo foi feito com trinta e dois alunos de EM do Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará e, ao final, a utilização do objeto de aprendizagem foi avaliado pelos alunos através de um dossiê avaliativo na forma de múltipla escolha: 54% dos estudantes entenderam que a principal proposta do objeto de aprendizagem “pato quântico” era a compreensão do efeito fotoelétrico e não somente o cálculo da constante de Planck; 88% dos alunos consideraram o objeto de aprendizagem motivador para a aprendizagem do conteúdo; 57% dos alunos atribuíram à interatividade do objeto de aprendizagem e 31%, ao caráter divertido do respectivo objeto o sucesso da aprendizagem;

Salientam os autores que a interação dos alunos com o ambiente virtual resultou em uma aprendizagem significativa do efeito fotoelétrico e que os objetos de aprendizagem podem funcionar como ferramentas prazerosas de descobertas e facilitadores do desenvolvimento cognitivo.

Carvalhos Neto et al (2009) descrevem os resultados da aplicação de uma proposta didática para ensinar aspectos da MQ, em especial, seu caráter preditivo probabilístico. Neste trabalho os autores basearam-se na aprendizagem significativa de Ausubel utilizando a concepção de previsão, já presente na estrutura cognitiva dos alunos, como ancoragem para o desenvolvimento do conceito de previsão física evitando analogias com à mecânica clássica e, inclusive, diferenciando as ideias contidas na mecânica clássica e na mecânica quântica.

Segundo os autores, os estudantes envolvidos com este trabalho, devido suas concepções alternativas, atribuíam ao aspecto preditivo probabilístico da MQ uma ignorância no que diz respeito ao conhecimento sobre o sistema Quântico em questão e, tais concepções alternativas seriam resistentes à mudança porque, também, seriam frutos de aprendizagens significativas. Os autores não esperam que os estudantes abandonem estas concepções, mas que tomem consciência de que elas estão erradas no contexto científico.

Este trabalho trata-se de uma pesquisa qualitativa, baseada na observação participativa, coleta, análise e interpretação das informações aplicada num grupo de dez alunos de terceiro ano do EM de uma escola privada se Salvador. Os alunos foram divididos em dois grupos de cinco alunos. O primeiro grupo fez parte da fase exploratória do estudo e o outro grupo da fase onde uma nova abordagem para o ensino de MQ foi aplicada. Em ambas as fases foram aplicados pré-testes, entrevistas prévias, um minicurso e entrevistas finais.

Os autores destacam que durante as entrevistas preliminares, nenhum dos cinco alunos da fase exploratória fez distinção entre os significados macroscópico e microscópico de probabilidade, prevalecendo a ideia de que probabilidade é a expressão de uma falta de conhecimento exato. A aplicação do pré-teste possibilitou a identificação de que os estudantes têm

uma clara conceituação do que é previsão no senso comum, mas que eles não a vêem como uma característica das teorias físicas. Pela entrevistas realizadas após o minicurso foi possível perceber que os cinco estudantes entenderam a incompatibilidade entre os conceitos de trajetória e o princípio da incerteza e que a MQ não proíbe a medida da posição ou da quantidade de movimento, mas sim, a medida simultânea de ambas. A maioria dos estudantes reconheceram que o uso de probabilidade na MQ não é reflexo da ignorância humana e alguns deles veem a MQ como uma teoria não preditiva por ela utilizar-se de probabilidades. Esta última constatação foi utilizada pelos autores como guia para a definição das estratégias adotadas durante a aplicação subsequente, em que a construção de significados sobre a natureza preditiva probabilística se deu a partir da discussão do experimento da fenda dupla com elétrons.

Por fim os autores concluem que houve aprendizagem significativa acerca das previsões essencialmente probabilísticas da MQ evidenciado pelo reconhecimento por parte dos alunos de que o ato de preparar e observar um determinado sistema quântico, em uma dada circunstância, define o fenômeno como ondulatório ou corpuscular, segundo o ponto de vista da complementaridade e pelo reconhecimento de que o elétron não é uma partícula clássica nem uma onda clássica e que há diferença entre o estado quântico e o estado clássico.

Pinto e Zanetic (1999) apresentam algumas reflexões sobre o ensino de FQ após o comportamento de luz ter sido abordado com alguns alunos do segundo ano do EM de uma escola pública de Estado de São Paulo, na qual o professor de física era o primeiro autor deste artigo.

Os autores sugerem uma abordagem onde sejam utilizadas diferentes interpretações do formalismo quântico e a História e Filosofia da Ciência como estratégia de ensino, fundamentando-se em algumas ideias de Bachelard, como pluralismo racional e perfil epistemológico.

Através da elaboração e aplicação de um teste os pesquisadores buscaram esboçar o perfil epistemológico dos alunos, a fim de levantar suas tendências filosóficas a respeito da natureza da luz.

Desenvolveram um minicurso centrado no tópico “luz” em doze aulas, contendo descrições históricas, aspectos filosóficos, atividades experimentais e lúdicas, como metodologias. Utilizaram um sistema de avaliação aberta, o qual era constituído pelo teste do perfil epistemológico, pela elaboração de trabalhos de divulgação de FQ e pela redação de um relatório final.

Pela análise dos relatórios dos alunos foi possível aos autores concluir: a necessidade de dar maior atenção à linguagem utilizada nos materiais didáticos e durante as aulas; a necessidade de se indicar outras referências para os alunos aprofundarem o tema em estudo; a necessidade de enfatizar a atividade experimental, explicitando a relação teoria-experimento; a necessidade de valorizar o formalismo da física, não aceitando o “formulismo” tradicional no EM; a necessidade da utilização de diferentes interpretações para um mesmo fenômeno permitindo, desta forma, que o aluno desenvolva sua própria interpretação e, por fim a necessidade da utilização de atividades diversificadas.

Para os autores a História e a Filosofia da Ciência atuam não somente como fatores motivacionais, mas, também, como facilitadores da construção conceitual e cultural da física.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 EPISTEMOLOGIA HISTÓRICA DE GASTON BACHELARD

A obra de Bachelard, segundo Japiassu (1992, p.63), é uma reflexão sobre as filosofias implícitas nas práticas efetivas dos cientistas que busca fornecer às ciências a filosofia que elas merecem. Bachelard utiliza a história das ciências como laboratório epistemológico para o questionamento filosófico desta mesma história propondo uma análise da história das ciências, de suas revoluções, bem como das diligências do espírito científico e, partindo desse questionamento, reformular os conceitos científicos existentes e reformar os conceitos filosóficos a respeito da ciência fazendo, neste percurso, diversas referências a questões pedagógicas.

A epistemologia bachelardiana não se afasta do estatuto da Filosofia, como, também, não se filia no discurso filosófico. Não aceita uma epistemologia submetida às premissas científicas nem tampouco aos sistemas filosóficos, mas, ao contrário, busca instrumentos teóricos para o surgimento de uma nova filosofia, que pense uma cultura científica contemporânea. Procura uma atitude conciliatória entre o discurso filosófico e o discurso científico, pois na sua ótica, a ciência em sua produção de conhecimentos está repleta de filosofias e o pensamento filosófico está sempre orientado para o conhecimento científico.

Deste modo a epistemologia de Bachelard assume a forma de uma filosofia das ciências. Uma nova filosofia das ciências, como uma necessidade de instaurar uma filosofia verdadeiramente adequada ao pensamento científico contemporâneo, na qual as ciências se encontrem com a filosofia renovada e a filosofia se aprofunde no conhecimento científico.

Bachelard, ao assumir a Epistemologia como uma filosofia das ciências, opõe-se aos sistemas filosóficos tradicionais, que pensam em torno de uma filosofia finalista e fechada, que concebem a filosofia das ciências como uma espécie de síntese dos resultados gerais do pensamento científico, rompe radicalmente com o espírito cartesiano, criticando, principalmente, a ideia de conhecimento enquanto adequação e a ideia de objetividade como intersubjetividade transcendental. Para Bachelard a adequação é “um mostro epistemológico” e o conhecimento é sempre aproximado não só pela fugacidade e complexidade do real, como pela presença dos obstáculos epistemológicos enraizados no próprio ato do conhecimento. Não

existe coincidência entre o pensamento e o real. O real é sempre produto de um processo de objetivação, só é possível falar em objeto construído através de uma construção racional.

Diante das insuficiências filosóficas do realismo ingênuo e do racionalismo idealista surge, então, a epistemologia histórica de Bachelard “como produto da ciência criticando-se a si mesma, onde a verdadeira questão diz respeito à força e aos poderes da ação racionalista, mas, ao mesmo tempo, à força e ao poder da atividade criadora e poética” (JAPIASSU, 1992, p.67). Uma filosofia aberta não dogmática, não voltada para as verdades primeiras, acabadas e definitivas; uma filosofia que ultrapassa seus próprios princípios, ajustando-se às ciências contemporâneas.

A filosofia da ciência física é talvez a única filosofia que se aplica determinando uma superação de seus princípios. Em suma, ela é a única filosofia aberta. Qualquer outra filosofia coloca seus princípios como intocáveis, as suas verdades primeiras como totais e acabadas. Qualquer outra filosofia se glorifica pelo seu caráter fechado (BACHELARD, 1984, p. 163).

Ganguilhem, citado por Japiassu (1992, p.78), contesta as “alienações” das filosofias idealistas do conhecimento, bem como os exageros “objetivantes” das filosofias positivistas. Acredita que, assim como a epistemologia de Bachelard é histórica, uma verdadeira história das ciências só pode ser epistemológica: “sem referência à epistemologia, uma teoria do conhecimento seria uma meditação sobre o vazio; e sem relação à história das ciências, uma epistemologia seria uma réplica perfeitamente supérflua da ciência sobre a qual pretenderia discorrer”. Portanto a história das ciências não pode ser entendida como uma crônica, mas ao contrário, consiste em tornar sensível e inteligível, ao mesmo tempo, a edificação difícil, retomada e retificada do saber. A complacência em procurar e descobrir precursores é o sintoma mais claro da inaptidão à crítica epistemológica, pois se existisse precursor, a história das ciências perderia todo o seu sentido e a própria ciência só teria dimensão histórica na aparência. Ganguilhem entende, então, que o “vírus do precursor” deve ser eliminado, visto que, a ciência deve ter sua temporalidade específica e proceder sempre por reorganizações, por rupturas e mutações, passando pela experiência de acelerações e de recuos.

Trata-se de uma epistemologia crítica, polêmica, antiempírica e racionalista e o princípio desta polêmica encontra-se nos transtornos e embaraços por que passa a história das ciências. Defende a tese segundo a qual as ciências devem produzir, a cada momento de sua história, suas próprias normas de verdade. Para Bachelard a verdade não é uma qualidade que pertenceria a esta ou àquela opinião particular, mas o resultado da negação mútua das opiniões num conflito entre os produtores de ideias.

A dialética de Bachelard é uma “dialética do não” identificada com o movimento de generalização reorganizadora do saber, pela qual as contradições são superadas como ilusões de oposição num conflito real da prática dos cientistas e, é somente ao término de uma polêmica contra os erros do passado, compreendendo estes erros, que a verdade adquire seu pleno sentido. Para Bachelard não há verdade primeira, apenas erros primeiros.

Bachelard fundamenta sua obra no princípio epistemológico de base, segundo o qual o conhecimento científico jamais atinge uma verdade objetiva, absoluta. A ciência só nos fornece um conhecimento aproximado, jamais engloba fatos estabelecidos e está em permanente retificação. Assim, não é possível identificar “ciência” e “verdade”, isto é, nenhuma teoria científica pode ser encarada como saber definitivo e sua objetividade é resultado de uma construção, de uma conquista e de uma retificação dos fatos da experiência pela razão. Segundo Popper, citado por Japiassu (1992, p.108), “uma teoria científica se coloca permanentemente em estado de risco”, o que leva Bachelard a afirmar: “no reino do pensamento, a imprudência é um método”.

Para Bachelard todo sistema de enunciados empíricos com pretensão de validade científica precisa passar por uma comprovação da realidade, no entanto, tal formulação teórica não deverá estar necessariamente atrelada à existência atual de técnicas que possibilitem sua verificação no exato momento em que ela se expressa. Nenhum enunciado teórico poderá ser considerado como definitivamente estabelecido, pois permanece a possibilidade teórica de se descobrir novos meios capazes de questionar tais observações e de rejeitar a teoria que tais observações validam.

Discordando da crença segundo a qual é possível principiar com observações puras, sem que elas se façam acompanhar por algo que tenha a natureza de uma teoria, Bachelard destaca que toda constatação supõe construção, toda prática científica engaja pressupostos teóricos, a teoria progride por retificações, isto é, pela integração das críticas destruindo a imagem das primeiras observações. Todas as observações já são interpretações de fatos observados à luz de uma teoria.

Com a noção de ruptura epistemológica, Bachelard se opõe as tradições positivistas, reconhecendo que, nos fatos, há ciência coexistindo com ideologias e a necessidade de uma filosofia capaz de neutralizar os discursos ideológicos e impedindo, na medida do possível, o aparecimento dos obstáculos epistemológicos, isolando, na prática científica, os interesses ideológicos e filosóficos.

Ao admitir que, quanto mais específicos forem os enunciados empíricos, mais probabilidades eles terão de se revelarem errôneos, mas também, maiores chances de fornecerem melhores e mais úteis conteúdos informativos, Bachelard, nesta perspectiva, propõe o esforço de apreender a lógica do erro para reconstruir uma lógica da descoberta da verdade como polêmica contra o erro, como refutação dos erros, submetendo as verdades aproximadas da ciência e os métodos que ela utiliza a uma retificação permanente. Assim, a epistemologia de Bachelard se caracteriza pela reflexão crítica sobre a ciência, enquanto processo, em seu vir-a-ser.

... uma epistemologia aplicada, não mais à natureza e ao valor do conhecimento, à ciência feita, realizada e verdadeira, da qual se deveria apenas descobrir as condições de possibilidade, de coerência ou títulos de sua legitimidade, mas às ciências em vias de se fazerem e em suas condições reais de crescimento (JAPIASSU, 1992, p.71).

Ao assumir como postulado primeiro “o primado teórico do erro”, o qual afirma que um conhecimento que se furta à crítica, conseqüentemente, à refutação e à retificação, está fadado à estagnação, a epistemologia de Bachelard define o progresso do conhecimento como retificação incessante, que se faz por rupturas com o senso comum, com as opiniões primeiras ou as pré-noções de nossa filosofia espontânea. A ciência cria seus objetos próprios pela destruição dos objetos da percepção comum, dos conhecimentos imediatos. O conhecimento deixa de ser contemplativo e torna-se operativo. Não é contemplando, mas construindo, criando, produzindo, retificando que o espírito chega à verdade.

Um conceito bastante significativo para a Epistemologia de Bachelard é o conceito de fenomenotecnia, empregado pela primeira vez por Bachelard para significar o que seria o “racionalismo aplicado”. O real imediato e aparente não contribui para o desenvolvimento da ciência e nem para o aparecimento da “novidade”, a ciência não é uma fenomenologia, é uma fenomenotécnica. Este conceito, mediador entre a natureza e a cultura, refere-se ao fenômeno natural que não mais se apresenta como aquele que pode ser observado pelos sentidos, mas aquele que é produto de aparelhos, de técnicas altamente elaboradas passando a ser um fenomenotécnico.

Interpretando as conseqüências da Mecânica Quântica para o campo epistemológico, Bachelard faz a distinção entre o real dado e o real científico. A construção do objeto do conhecimento nas ciências físicas, o real científico, é realizada na relação sujeito-objeto, mediada pela técnica, promovendo a existência de fenômenos que não estão naturalmente na natu-

reza através de uma fenomenotécnica, técnica do agir-cientificamente-no-mundo. O fenômeno é o real dado, o mero evento. O real só adquire caráter científico se é objeto de uma fenomenotécnica.

Na medida que o real científico se diferencia do real dado, o conhecimento comum, fundamentado no real dado, no empirismo das primeiras impressões, é contraditório com o conhecimento científico, que trabalha em um mundo recomeçado, estruturado em uma fenomenotécnica e é nesse sentido que o conhecimento comum acaba por ser um obstáculo epistemológico ao conhecimento científico.

Ganguilhem, citado por Japiassu (1980, p.79), destaca a importância de Bachelard na revolução epistemológica contemporânea não somente pelo fato de ele ter introduzido os conceitos-chave como “Recorrência”, “Vigilância”, “Obstáculo” e “Corte” epistemológico, mas, também, pelo fato de ele ter reconhecido que a ciência não é o pleonasmo da experiência:

Ela se faz contra a experiência, contra a percepção e toda técnica usual. Sendo uma operação especificamente intelectual, tem uma história, mas não tem origens. É a gênese do Real, embora sua própria gênese não possa ser narrada, apenas descrita como recomeço, pois não é a frutificação de um pré-saber (JAPIASSU, 1980, p.79).

Para Bachelard a ciência, como o homem, não é criação da necessidade, mas do desejo. A ciência, também é intervencionista e deve ser feita numa comunidade de pesquisas e de críticas para não se tornar totalitária, assim, Bachelard substitui o *cogito* cartesiano pelo *cogitamus* que cria uma sociedade estudiosa onde os espíritos se educam uns aos outros. Para Bachelard o homem só é uma péssima companhia, o homem apreende sempre e o mestre deve sempre fazer-se aluno.

Bachelard, afastando-se do falso saber que se sabe, defende uma ciência da solidariedade interconceitual e uma experiência que provoca e remodela as ideias, combate a ciência formalizada que descreve de qualquer modo os seus teoremas e o ensino dedutivo. Defende uma escola em que o professor se torne verdadeiramente um aluno, pois a ciência impõe este rejuvenescimento e esta inversão de “papéis”, a cultura científica exige o papel de estudante de todos seus participantes, frequentando a escola uns dos outros no processo de ensinar e apreender, afastando, desta forma, qualquer postura dogmática. Quem é ensinado deve ensinar, pois, uma instrução que se recebe sem que se a transmita forma espíritos sem dinamismo, sem autocrítica, sobretudo nas disciplinas científicas, uma instrução desse gênero fixa no

dogmatismo um conhecimento que deveria ser um impulso para uma diligência inventiva. E, acima de tudo, falha em dar a experiência psicológica ao erro humano.

A pessoa afeita à cultura científica é um eterno estudante. A *escola* é o modelo mais elevado da vida social. Continuar sendo estudante deve ser o voto secreto de todo professor. Devido à própria natureza do pensamento científico em sua prodigiosa diferenciação, e devido à inevitável especialização, a cultura científica coloca incessantemente o verdadeiro cientista na situação de estudante. [...] De fato os cientista frequenta a escola uns dos outros. A dialética do mestre e aluno inverte-se sempre. No laboratório, um jovem pesquisador pode adquirir conhecimento tão avançado de certa técnica ou tese que, na questão, torna-se mestre de seu mestre. Há nisso elementos de uma pedagogia dialogada da qual não se presume nem a força nem a novidade, se não se toma parte ativa numa comunidade científica (BACHELARD, 1977, p. 31).

Bachelard destaca, ainda, que este papel da escola científica deveria ser transposto para a escola secundária tornando seu ensino socialmente ativo, todos se fazendo estudantes e professores, reelaborando o conhecimento em um saber aberto, operários racionalistas da instrução científica, sendo função do mestre a comunicação, sem dogmatismo, da dinâmica do racionalismo, fazendo compreender, ou em estágio mais avançado, compreender melhor.

Segundo Japiassu (1980, p.70) aquilo que hoje chamamos de escola permanente está em consonância com o princípio da *cultura contínua* fundado por Bachelard:

Na obra da ciência só se pode amar o que se destrói, pode-se continuar o passado negando-o, pode-se venerar o mestre contradizendo-o. Aí, sim, a Escola prossegue ao longo da vida. Uma cultura presa ao momento escolar é a negação da cultura científica. Só há ciência se a Escola for permanente. É essa escola que a ciência deve fundar. Então, os interesses sociais estarão definitivamente invertidos: A Sociedade será feita para a Escola e não a Escola para a Sociedade (BACHELARD, 2011, p. 309).

O fato do professor não entender porque o aluno não compreende é uma consequência do desconhecimento ou do desinteresse docente pelo conhecimento anterior do educando, dos entraves existentes nesse conhecimento e tal fato é caracterizado por Bachelard como sendo um obstáculo pedagógico.

Outro aspecto relevante da epistemologia bachelardiana que deve ser destacado é a sua filosofia do inexato ao pensar a ciência moderna. Bachelard ao se afastar da ilusão da quantidade, do realismo possessivo, da ideia de que só se conhece aquilo que se mede, define e defende aquilo que chamou de “aproximacionalismo”, revelando os contrassensos contidos na crença segundo a qual a ciência aprisionaria o ser nas malhas de decimais cada vez mais finos e precisos.

De acordo com Bachelard, em todos os níveis da experimentação não se deve nunca separar o resultado do aparelho que o permite ou do método que o autoriza e determinar constantemente o que de fato pode ser negligenciado. Trata-se da solidarização do objeto da medida com a própria medida.

De acordo com Dagognet (1980, p.19), a dificuldade na operação para se obter um resultado mais afinado não consiste nem na realidade fugaz nem no aparelho insensível, mas apenas nas formas de pensar ou de operar. Bachelard na sua obra Ensaio sobre o conhecimento aproximado, citado por Dagognet (1980, p.19), destaca que:

Para registrar os micros fenômenos, são necessários outros quadros dos que são utilizados para os fenômenos massivos. Métodos e micros métodos dizem respeito a duas ordens de experiências que obedecem cada uma a princípios especiais[...]. O inimigo do cientista no domínio da segunda aproximação são os hábitos científicos que ele ganhou ao estudar a primeira.

Para se obter um resultado mais preciso, além do limite do instrumento de medida, não adianta aumentar as preocupações ou retomar as medidas.

A precisão só recompensa aqueles que abandonam o realismo da coincidência: é o caso do espectrógrafo de massa ou do microscópio eletrônico. E o que não é mais fino nem mais exato, mas diferente, transformará os dados prévios. Daí resulta esta metrologia francamente descontínua, rica de rupturas e este tema que se tornou célebre: cada método está destinado a tornar-se, primeiro, antiquado e, depois, nocivo (DAGOGNET, 1980, p.19).

Influenciado pela ciência da física do século XX, Bachelard, sinalizando para o vetor abstração que caracteriza a evolução de ciência, formula a lei dos três estados, segundo a qual o espírito científico na sua formação individual passaria necessariamente pelos três estados seguintes:

1° O estado concreto, em que o espírito se entretém com as primeiras imagens do fenômeno e se apoia numa literatura que exalta a Natureza, louvando curiosamente ao mesmo tempo a unidade do mundo e sua rica diversidade.

2° O estado concreto-abstrato, em que o espírito acrescenta à experiência física esquemas geométricos e se apoia numa filosofia da simplicidade. O espírito ainda está numa situação paradoxal: sente-se tanto mais seguro de sua abstração, quanto mais claramente essa abstração for representada por uma intuição sensível.

3° O estado abstrato, em que o espírito adota informações voluntariamente subtraídas à intuição do espaço real, voluntariamente desligada da experiência imediata e até em polêmica declarada com a realidade primeira, sempre impura, sempre informe (BACHELARD, 2011, p. 11).

Numa análise psicológica do progresso científico Bachelard coloca o problema do conhecimento científico em termos de obstáculos que surgem no âmago do próprio ato de conhecer, como uma espécie de imperativo funcional, lentidões e conflitos, os quais devem ser constantemente superados:

É aí que mostraremos causas de estagnação e até de regressão, detectaremos causas de inércia às quais daremos o nome de obstáculos epistemológicos. O conhecimento do real é luz que sempre projeta algumas sombras. Nunca é imediato e pleno. As revelações do real são recorrentes. O real nunca é “o que se poderia achar”, mas sempre o que se deveria ter pensado. O pensamento empírico torna-se claro depois, quando o conjunto de argumentos fica estabelecido. Ao retomar o passado cheio de erros, encontra-se a verdade num autêntico arrependimento intelectual. No fundo, o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos, superando o que, no próprio espírito, é obstáculo à espiritualização (BACHELARD, p. 17, 2011).

A razão acomodada ao que já conhece, procura manter a continuidade do conhecimento, opondo-se à retificação dos erros ao introduzir analogias, metáforas e imagens no próprio ato de conhecer, com o fim de tornar familiar todo conhecimento abstrato, constituindo, assim, obstáculos epistemológicos. Tais obstáculos são identificados como epistemológicos, pois surgem no próprio ato de conhecer, numa relação entre o sujeito e o objeto do conhecimento.

Os obstáculos epistemológicos tendem a constituir-se, então, como antirrupturas, pontos de resistência do pensamento ao próprio pensamento, instinto de conservação do pensamento, uma preferência pelas respostas e não pelas questões.

Bachelard propõe, então, a realização de uma Psicanálise do conhecimento objetivo, retirando dele todo caráter subjetivo, mostrando a influência dos valores inconscientes na própria base do conhecimento empírico e científico. Propõe, também, a necessidade de valorização do pensamento científico abstrato e aponta a experiência imediata como um obstáculo epistemológico ao desenvolvimento dessa abstração. “Frente ao real, o que se pensa saber, claramente ofusca o que se deveria saber. Quando se apresenta ante à cultura científica, o espírito nunca é jovem. Ao contrário é velhíssimo, pois tem a idade dos nossos preconceitos” (BACHELARD, 2011, p.18).

Para a superação destes obstáculos epistemológicos Bachelard destaca a necessidade de se desenvolver o instinto formativo, isto é, a permanente disposição do espírito para um estado de inquietação que: não lhe permita aceitar a ideia errônea de que a ciência constrói-se por meio de generalizações superficiais; force-lhe a formular interrogações e problematizações, legítimos caminhos da produção científica; impeça a procura por identidades aparentes e

imprecisas entre os fenômenos e que não perca de vista a produção de abstrações conceituais como horizonte da ciência. Em oposição a este, temos o instinto conservativo o qual remete a condutas pautadas em maneiras de agir e raciocinar que ao invés de libertar, tendem a encalçar o espírito nas malhas dos obstáculos epistemológicos, em estado de não mobilização e mesmo apatia em nada alinhado com o instinto formativo.

Ao invocar o instinto para destacar a justa resistência de certos obstáculos epistemológicos e das inter-relações entre estes instintos, Bachelard afirma:

Mas, o instinto *formativo* acaba por ceder ao instinto *conservativo*. Chega o momento em que o espírito prefere o que confirma seu saber àquilo que o contradiz, em que gosta mais das respostas do que das perguntas. O instinto *conservativo* passa então a dominar, e cessa o crescimento espiritual (BACHELARD, p. 19, 2011).

Bachelard leva esta discussão para o campo da educação sugerindo que a geração dos instintos conservativos pode ocorrer nos processos escolares de ensino-aprendizagem da escola:

Admitindo até que uma *cabeça bem feita* escape ao narcisismo intelectual tão frequente na cultura literária e na adesão apaixonada aos juízos do gosto, pode-se com certeza dizer que uma cabeça bem feita é infelizmente uma cabeça fechada. É um produto da escola.

Com efeito, as crises de crescimento do pensamento implicam uma reorganização total do sistema de saber. A cabeça bem feita precisa então ser refeita. Ela muda de espécie. Opõe-se à espécie anterior por uma função decisiva. Pelas revoluções espirituais que a invenção científica exige, o homem torna-se mutante, ou melhor dizendo, uma espécie que tem necessidade de mudar, que sofre se não mudar (ibid., p. 20).

Na área da educação, Bachelard destaca, ainda, as concepções alternativas, as quais fazem referência ao conjunto de concepções manifestas pelos alunos e que estão, via de regra, em desacordo com as noções científicas que se pretende ensinar. Correspondem a representações dos sujeitos sobre os fenômenos, a partir de suas vivências e experiências como atores no mundo físico e social. Dizem respeito, primeiramente, ao conteúdo do pensamento. Por sua vez, os obstáculos epistemológicos estariam mais vinculados à forma do que ao conteúdo do pensamento, compondo o grupo de razões que nos ajudariam a entender as origens das concepções alternativas.

A Existência dos obstáculos faz com que o erro seja algo natural na ciência e em sua história, tanto quanto na sala de aula. É pela consciência do erro que pode ocorrer a superação dos obstáculos. Assim, o erro adquire uma conotação positiva, útil. O erro assume uma impor-

tância pedagógica fundamental. Ainda no contexto escolar observa-se o caráter de ruptura entre a ciência e as observações primeiras e imediatas, apontando diferenças entre os significados dos conceitos científicos e os de mesmo nome, no contexto dos conhecimentos cotidianos.

Como o desenvolvimento da ciência é um processo descontínuo onde a ruptura com conhecimentos anteriores é constante, na medida em que sempre se conhece contra um conhecimento anterior, retificando erros da experiência comum e construindo a experiência científica em um constante diálogo com a razão, é preciso, portanto, superar os obstáculos epistemológicos.

Para Bachelard o conhecimento científico precisa, antes de mais nada, estabelecer uma ruptura com o conhecimento comum ou experiência básica, pois esse é seguramente o principal obstáculo à construção de saber científico, propõe, então, uma efetiva psicanálise do espírito científico para desobstaculizar os pensamentos que se atrofiam ou que ficam entorpecidos por verdades tidas como fixas, imutáveis, libertando, deste modo, o espírito científico da influência das inúmeras valorizações que prejudicam os verdadeiros valores do pensamento científico. Segundo Bachelard:

[...] todo indicio de *valorização* é um mau sinal para um conhecimento que busca a objetividade. Nesse domínio, o valor é marca de uma preferência inconsciente. [...] uma psicanálise do conhecimento objetivo deve resistir a toda valorização. Deve não apenas transmutar todos os valores; mas também expurgar radicalmente de valores a cultura científica (BACHELARD, 2011, p.81).

Bachelard destaca que o espírito científico não permite que se aceite a opinião como fundamento de qualquer saber, visto que a opinião é fruto de um pensamento malfeito, resultado de um não-pensar.

A opinião *pensa* mal; não *pensa*: *traduz* necessidades em conhecimentos. Ao designar os objetos pela utilidade, ele impede de conhecê-los. Não se pode basear nada na opinião: antes de tudo, é preciso destruí-la. Ela é o primeiro obstáculo a ser superado. [...] O espírito científico proíbe que tenhamos opinião sobre questões que não compreendemos, sobre questões que não sabemos formular com clareza. Em primeiro lugar é preciso saber formular problemas (BACHELARD, 2011, p.81).

A formulação de tais problemas que caracterizam o espírito científico não se dá de modo espontâneo, mas através de sucessivas racionalizações. Só há conhecimento científico como resposta a um problema bem formulado, pois em ciência “Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído” (BACHELARD, 2011, p.18).

Na sua obra *A Formação do Espírito Científico* (2011) Bachelard faz uma análise dos diversos tipos de obstáculos epistemológicos, localizando-os historicamente na construção do pensamento pré-científico e traçando um paralelo com o pensamento moderno e contemporâneo. Bachelard classifica os obstáculos epistemológico em dois grupos: obstáculos gerais e obstáculos particulares.

No primeiro grupo temos a experiência primeira e a generalização prematura como obstáculos epistemológicos.

Os obstáculos particulares, destacados no conjunto da obra citada, muitas vezes são derivados dos primeiros guardando, portanto, profundas relações, ou estando, de certa forma, implícitos nos obstáculos gerais.

O primeiro obstáculo epistemológico elencado por Bachelard na formação do espírito científico é a **experiência primeira**, as impressões resultantes da observação primeira, a experiência colocada antes e acima da crítica.

Para Bachelard (2011, p.57), “O que existe de mais imediato na experiência primeira somos nós mesmos, nossas surdas paixões, nossos desejos inconscientes”.

O conhecimento científico não se dá a partir do dado, daquilo que se apresenta ao espírito como nítido, constante, seguro, mas sim quando o dado for racionalizado, pois entre a observação e experimentação há ruptura e, não continuidade.

Bachelard defende a tese:

O espírito científico deve formar-se, *contra* a Natureza, contra o que é, em nós e fora de nós, o impulso e a informação da Natureza, contra o arrebatamento natural, contra o fato colorido e corriqueiro. O espírito científico deve formar-se enquanto se reforma. Só se pode aprender com a Natureza se purificar as substâncias naturais e puser em ordem os fenômenos baralhados. [...] compreendemos a Natureza quando lhe oferecemos resistência (BACHELARD, 2011, p.29).

Sobre a ação desse obstáculo na educação Bachelard (2011, p.48) destaca que nas classes do curso elementar, o pitoresco e as imagens podem obstaculizar a aprendizagem. Experiência com equipamento esquisito, explosões, incidentes, fazem o interesse chegar ao auge, contudo, sem olhar os fenômenos essenciais, isto é, as experiências muito marcantes, cheios de imagens, são falsos centros de interesse. O professor deve o mais depressa possível extrair o abstrato do concreto e quando o aluno voltar à experiência estará mais preparado para distinguir os aspectos orgânicos do fenômeno.

Ainda nessa área, Bachelard (2011, p.50) pontua que reformas no ensino secundário, que diminuem a dificuldade dos problemas de física, até um ensino de física sem problemas, desconhecem o real sentido do espírito científico. “Mais vale a ignorância total de que um conhecimento esvaziado de seu princípio fundamental”.

O segundo obstáculo epistemológico elencado por Bachelard é a **generalização prematura, a falsa doutrina do geral** que tanto prejudicou o progresso do conhecimento científico, e que continua sendo para muitos, uma doutrina fundamental do saber. Para Bachelard a ciência do geral sempre é uma suspensão da experiência, um fracasso do empirismo inventivo, caracterizada pelo perigoso prazer intelectual da generalização apressada e fácil.

Há de fato um perigoso prazer intelectual na generalização apressada e fácil. A psicanálise do conhecimento objetivo deve examinar com cuidado as seduções da *facilidade*. Só com essa condição pode-se chegar a uma teoria da abstração científica verdadeiramente sadia e dinâmica (BACHELARD, 2011, p.69).

Na argumentação sobre este obstáculo epistemológico, Bachelard denuncia a busca prematura do geral, certa tendência a generalizações precipitadas que tentam englobar fenômenos mais diversos sob o mesmo conceito. Na sua visão “nada de mais anticientífico do que afirmar sem prova, ou sob a capa de observações gerais e imprecisas, causalidades entre ordens de fenômenos diferentes” (2011, p.271).

Para ilustrar suas teses em torno desse obstáculo Bachelard utiliza a ciência dos séculos XVII e XVIII e a partir do conceito genérico de coagulação, por exemplo, que era utilizado para designar as transformações de estado ocorridas tanto com o sangue, como com o leite, a gordura e, inclusive, o fenômeno do congelamento da água, mostra o quanto é absurda essa tendência à universalização que acaba bloqueando o dinamismo do pensamento pelo fato de emprestar uma falsa e enganadora clareza sobre os fenômenos, o que dificulta e até mesmo impede a proliferação dos conceitos.

A partir dessa caracterização dos obstáculos gerais já temos uma boa noção do que sejam e como persistem os obstáculos epistemológicos nos processos de construção científica. No entanto, destacaremos mais alguns obstáculos epistemológicos, dentre os obstáculos particulares, devido nosso interesse pela esfera pedagógica:

A noção de *obstáculo epistemológico* pode ser estudada no desenvolvimento histórico do pensamento científico e na prática da educação. [...] na educação a noção de obstáculo epistemológico também é desconhecida. Acho surpreendente que os professores de ciências, mais do que os outros se possível fosse, não compreendam que alguém não compreenda. Poucos são os que se detiveram na psicologia do erro, da ignorância e da irreflexão. [...] Os professores de ciências imaginam que o espírito

começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos: não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* de cultura experimental, de derrubar obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana (BACHELARD, 2011, p. 21,23).

Ao tratar do **obstáculo verbal**, Bachelard preocupa-se com os hábitos de natureza verbal que, ao invés de ajudar, prejudicam a formação do espírito científico. Dado que o progresso da ciência se dá de forma descontínua e que entre o conhecimento do passado e o conhecimento atual há ruptura, é necessário que ocorra também a retificação da linguagem, para que essa se torne adequada à ciência contemporânea.

No entanto, os processos de renovação da linguagem são bem mais lentos do que os processos da própria ciência, motivo pelo qual muitas vezes surgem palavras que vão constituir-se em obstáculos à explicação científica, quando deveriam expressar os fenômenos constituídos pela ciência.

Bachelard ilustra esse obstáculo através de um exemplo acerca da palavra esponja, extraído da obra de Réaumur, publicado em 1731 nas *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, no qual o autor abusa do acúmulo das imagens, o que prejudica a razão.

Um movimento pura e simplesmente linguístico, ao associar a uma palavra concreta uma palavra abstrata, não garante o avanço das ideias, justamente porque se mantém uma imagem primitiva, demasiado empírica. Para Bachelard (2011, p.94), “Para ser coerente, uma teoria da abstração necessita afastar-se bastante das imagens primitivas”.

É importante destacar que os obstáculos verbais, assim como outros obstáculos, não foram definitivamente superados e ainda hoje subsistem diversos obstáculos de hábitos de linguagem, como é o caso da palavra “matéria”, que se encontra, ainda, impregnada de um sentido realista e que apenas lentamente vai sendo depurada pela ciência contemporânea. Para exemplificar destacamos o conceito químico atual de matéria, no qual não estão presentes propriedades como dureza, imobilidade, e de cor, no entanto o uso dessa palavra muitas vezes sugere ou recupera tais imagens ou propriedades, constituindo-se dificuldades a constituição do espírito científico, exigindo redobrada vigilância contra a utilização inadequada da linguagem.

Outro obstáculo particular de que trata Bachelard é o **obstáculo substancialista**, o qual é constituído por:

Intuições muito dispersas e até opostas. Por uma tendência quase natural, o espírito científico condensa num objeto todos os conhecimentos em que esse objeto desempenha um papel, sem se preocupar com a hierarquia dos papéis empíricos (BACHELARD, 2011, p.121).

No conhecimento científico, obstaculizado pelo substancialismo, vigora o mito do interior, do mais profundo íntimo que encerra a qualidade. Uma qualidade é tão mais substancial quanto mais íntima for, articulando, desta forma, o substancialismo do íntimo com o substancialismo do oculto, para o qual a substância é um interior.

O substancialismo se alterna do interior ao exterior, buscando no profundo as justificativas do evidente. Deste modo, a ideia substancialista também se caracteriza pela noção de qualidade evidente, qualidade superficial. Nessa ótica, um conjunto de propriedades é visto como pertencente à determinada substância, razão única para todas as suas qualidades, não podendo haver variação de qualidade sem variação de substância.

As qualidades são encaradas como atributos das substâncias, não considerando que as substâncias são inteiramente relativas umas às outras e suas propriedades são frutos dessas relações, também é desconsiderada a relação entre a substância e a técnica articulada pela razão.

Como a noção de substância está bastante arraigada no senso comum, o obstáculo substancialista é um dos mais difíceis de superar e somente a partir de um grande esforço no sentido de buscar compreender as relações dos fenômenos, reconhecendo que as propriedades das coisas se reduzem às relações delas com o homem, em vez de procurar as qualidades numa substância, é que se consegue superar tal obstáculo.

A substancialização de uma qualidade imediata percebida numa intuição direta pode entravar os futuros progressos do pensamento científico tanto quanto a afirmação de uma qualidade oculta ou íntima, pois tal substancialização permite uma explicação breve e peremptória. Falta-lhe o percurso teórico que obriga o espírito científico a criticar a sensação. De fato, para o espírito científico, todo fenômeno é um momento do pensamento teórico, um estágio do pensamento discursivo, um resultado preparado. É mais produzido do que induzido. O espírito científico não pode satisfazer-se apenas com ligar os elementos descritivos de um fenômeno à respectiva substância, sem nenhum esforço de hierarquia, em determinação precisa e detalhada das relações com outros objetos (BACHELARD, 2011, p. 127).

Com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, o substancialismo é superado por uma racionalidade não-substancialista. O elétron, como “não-substância”, é representado pela função de onda com seus pesos estatísticos que descreve seu estado, o objeto de estudo se matematiza e a substância, na sua complexidade matemática, é pouco mais do que uma chance de reação. Veremos no próximo capítulo como este obstáculo está presente na maioria dos livros

didáticos, como consequência do realismo empregado na interpretação da dualidade onda partícula.

O obstáculo animista consiste na introdução do conceito “vida”, em domínios e áreas bem distintos daquele das ciências biológicas, privilegiando o corpo humano e os fenômenos vitais, atribuindo-lhes um valor superior na hierarquia fenomenológica, fazendo a vida transcender ao domínio que lhe é próprio. Trata-se de uma intuição ofuscante que considera a vida como um dado claro e geral.

Segundo Bachelard (2011, p.185), em certo estágio do pensamento pré-científico, foram os fenômenos biológicos que serviram de meio de explicação para os fenômenos físicos, por exemplo, onde a biologia respondia perguntas que não lhe eram feitas.

A palavra vida é uma palavra mágica, magia facilmente associável ao calor, à eletricidade, ao movimento, ao que se mostra impulsionador. Fenômenos como o magnetismo e a eletricidade foram essencialmente obstaculizados pelo animismo, pois seu caráter de atração e repulsão de corpos e a energia a eles associada, tendiam a ser explicados por algum princípio vital.

É importante salientar que as imagens animistas continuaram sendo utilizadas nos livros didáticos após o período pré-científico:

Depois de 1968 os obstáculos animistas não são mais fruto, necessariamente, da presença do espírito pré-científico. As imagens animistas parecem ser intencionalmente empregadas para atingir o aluno, obter a “compreensão” dos conceitos, ou ao menos, a capacidade de resolver exercícios objetivos. Certa concepção facilitadora da didática, a qual visa a todo custo atrair e motivar os alunos, parece ser utilizada intensamente em virtude do acentuado caráter abstrato dos conceitos introduzidos a partir da atomística mais moderna. Com os recursos anímicos, exatamente pela ponte que permitem construir entre o conhecimento do aluno e o conhecimento científico, torna-se mais fácil a operacionalização de conceitos, sem a necessidade obrigatória do entendimento (LOPES, 2007, p.147).

Bachelard destaca, também, que **conhecimento unitário e pragmático** pode atuar como obstáculo epistemológico.

O conhecimento unitário, como obstáculo epistemológico, refere-se à situação na qual todas as dificuldades são resolvidas por uma visão geral do mundo, por uma simples referência a um princípio geral da Natureza. A ideia de uma natureza homogênea, harmônica e tutelar, apaga todas as singularidades, todas as contradições, todas as hostilidades da experiência. Para Bachelard (2011, p.103) tais generalidades e outras generalidades conexas constituem, de fato, obstáculos epistemológicos para o pensamento científico.

Bachelard (2011, p.107), destaca que esse obstáculo epistemológico no pensamento pré-científico pode ser exemplificado por um princípio fundamental da explicação, a perfeição dos fenômenos físicos e, que o princípio dessa perfeição era ligado ao ato criador.

Ainda no pensamento pré-científico, Bachelard pontua que o princípio da unidade era sempre desejado e sempre realizado sem esforço, onde as diversas atividades naturais eram manifestações de uma só e única Natureza. Segundo Bachelard (2011, p.107), “Essa necessidade de unidade traz uma multidão de falsos problemas”.

Outro princípio listado por Bachelard (2011, p.109) na discussão desse obstáculo epistemológico é o princípio da harmonia, crença na unidade harmônica do Mundo, que aparentemente estaria mais próximo do mundo objetivo, mas que, no entanto, levou a se estabelecer uma sobre determinação, característica da mentalidade pré-científica, onde se justapõem as propriedades mais heteróclitas, como se umas determinassem as outras, onde tudo acaba sendo causa de tudo.

O coeficiente de realidade que o espírito pré-científico atribui a tudo o que é natural é um dos obstáculos epistemológicos relacionado com a unidade e ao poder atribuído à Natureza. “Há nisso uma valorização indiscutida, sempre invocada na vida cotidiana e que, afinal, é causa de perturbação para a experiência e para o pensamento científico” (BACHELARD, 2011, p.113).

O obstáculo epistemológico que Bachelard relaciona com o **conhecimento pragmático** está relacionado com a indução utilitária que a própria utilidade fornece e que acaba levando a generalizações exageradas, pois segundo Bachelard:

O impulso utilitário levará, quase infalivelmente, longe demais. Todo pragmatismo, pelo simples fato de ser um pensamento mutilado, acaba exagerando. O homem não sabe limitar o útil. O útil, por sua valorização, se capitaliza sem medida. [...] A psicanálise do conhecimento objetivo deve romper com as considerações pragmáticas (BACHELARD, 2011, p.113).

No desenvolvimento do espírito pré-científico buscava-se uma utilidade humana em todos os fenômenos, não somente pela vantagem oferecida, mas como um princípio de explicação, pois nessa época encontrar uma utilidade era encontrar uma razão. Desta forma, para o racionalismo pragmático, um aspecto sem utilidade era um irracional.

Nesta perspectiva, o verdadeiro deve ser acompanhado do útil. O verdadeiro sem função é um verdadeiro mutilado, somente pela descoberta da utilidade é que se encontra a função real do verdadeiro. “Esse modo de ver utilitário é, porém, uma aberração” (BACHELARD, 2011, p.117).

Bachelard destaca que esse obstáculo foi muito perigoso no século XVIII, porque a exploração literária e filosófica da ciência, na época, era muito fácil, e os excessos apenas acentuam uma tendência cuja força estava presente nos escritores científicos de segunda ordem que se deixavam levar pela sedução da unidade de explicação por uma unidade característica, oferecendo apenas um amontoado de fatos mal relacionados, mal observados.

Bachelard destaca que as obras destes autores foram inúteis tanto sob o aspecto filosófico quanto sob o aspecto científico, pois não foram até o fundo de uma grande intuição metafísica, não reuniram os documentos empíricos como acontecia com o trabalho dos químicos e botânicos desta época.

Segundo Bachelard,

Já o século XIX viu desaparecerem quase de todo essas *cartas* informais e pretensiosas de mestres improvisados. O plano de cultura científica ficou muito mais nítido. Os livros elementares já não são tão falsos. Essa arrumação não deve esquecer a confusão existente na era pré-científica. É ao tomar consciência dessa revolução da cidadela erudita que se poderá, de fato, compreender a força de *formação psicológica* do pensamento científico e que se avaliará a distância do empirismo passivo e registrado ao empirismo ativo e pensado (BACHELARD, 2011, p.119).

Para Bachelard (2011, p. 116), “A psicanálise do conhecimento objetivo deve romper com as considerações pragmáticas”.

O pensamento científico assume em Bachelard uma caracterização contrária a qualquer formulação teórica que seja precedida de um modelo realista de produção do conhecimento, e que tenha suas formulações baseadas em pressupostos empíricos.

No seu estudo sobre o pensamento pré-científico Bachelard analisa o **mito da digestão** como obstáculo epistemológico. Destaca que a digestão “é uma função privilegiada, poema ou drama, fonte de êxtase ou de sacrifício” (2011, p.109), sendo muitas vezes um tema explicativo de valorização imediata para o inconsciente.

Para o pensamento pré-científico a digestão corresponde a uma tomada de posse, origem do mais forte realismo de abrupta avareza. É a função da avareza animista. E esta posse é objeto de todo um sistema de valorização.

O conhecimento objetivo imediato traz consigo um erro a ser retificado e o seu objeto é caracterizado por impressões subjetivas que precisam ser expurgadas. Tal conhecimento necessita de uma psicanálise, visto que um conhecimento imediato é, por princípio, subjetivo.

Trata-se, pois, de um conhecimento qualitativo que considera a realidade como um bem e oferece certezas prematuras que acabam entretendo o conhecimento objetivo.

O conhecimento quantitativo, também, corre estes mesmos riscos, visto que a *grandeza* não é automaticamente objetiva e o *objeto científico*, sujeito a influências das determinações primeiras, nem sempre mostra a variável adequada. Para Bachelard (2011, p.259), “é preciso muito estudo para que um fenômeno novo deixe aparecer a variável adequada”.

Bachelard (2011, p.260), destaca a influência da *ordem de grandeza* do homem sobre todos os nossos juízos de valor através das rupturas de escala desde a revolução copérnica até os dias de hoje. Estas rupturas de escala exigem do homem abstrações das grandezas comuns e de suas próprias grandezas, bem como, considerar sua relatividade com o método de medida, tornando claro aquilo que surge na mais imediata das intuições.

Para Bachelard, tanto a atração pelo matematismo demasiado vago, como a atração pelo matematismo demasiado preciso, atuam como obstáculo epistemológico ao conhecimento quantitativo.

No que se refere à atração pelo matematismo demasiado preciso, como uma das características do espírito não-científico, mesmo com pretensões de objetividade científica, temos o excesso de precisão e a precisão numérica como uma rebelião de números, contrariando a exigência científica que relaciona a precisão de uma medida com a sensibilidade do método de mensuração e com as condições de permanência do objeto medido. Para o espírito científico são inúteis tanto a medida exata de um objeto fugaz ou indeterminado, como a medida exata de um objeto fixo e bem determinado com um instrumento grosseiro.

Deste modo fica evidente o divórcio entre o pensamento realista e o pensamento do cientista:

O realista pega logo na mão o objeto particular. Porque o possui, ele o descreve e mede. Esgota a medição até a última decimal, como o tabelião conta uma fortuna até o último centavo. Ao inverso, o cientista *aproxima-se* do objeto primitivamente mal definido. E, antes de tudo, *prepara-se* para medir. Pondera as condições de seu estudo; determina a sensibilidade e o alcance de seus instrumentos. Por fim, *é o seu método de medir*, mais do que o *objeto de sua mensuração*, que o cientista descreve. O objeto medido nada mais é que um grau particular da aproximação do método de mensuração. O cientista crê no *realismo* da medida mais do que na *realidade* do objeto. O objeto pode, então, mudar de natureza quando se muda o grau de aproximação. Pretender esgotar de uma só vez a determinação quantitativa é deixar escapar as *relações* do objeto. Quanto mais numerosas forem as relações do objeto com outros objetos, mais instrutivo será seu estudo. Mas, quando as relações são numerosas, estão sujeitas a interferências e, bem depressa, a sondagem discursiva das aproximações torna-se uma necessidade metodológica. A objetividade é afirmada aquém da medida, enquanto método discursivo, e não além da medida, enquanto intuição direta de um objeto. É preciso refletir para medir, em vez de medir para refletir (BACHELARD, 2011, p. 261).

Interessante a comunhão deste pensamento como o conceito de medida dentro da interpretação positivista de Bohr da mecânica quântica.

As observações do desenvolvimento do espírito pré-científico, em direção ao real e afirmando-se em precisões excepcionais que consideram a precisão dos resultados além da precisão dos dados experimentais, demonstram que o exagero gratuito na precisão desta época era tomado como regra e os erros experimentais, mesmo que obtidos com uma técnica grosseira, seriam mais uma prova de uma identidade experimental do que uma diferença substancial.

Bachelard destaca, ainda, que esta atração pelo matematismo demasiado preciso, pode ser percebida na experiência pedagógica cotidiana, onde as aplicações numéricas são feitas sem a preocupação com o problema do erro, impedindo, desta forma, que o aluno perceba que quando a precisão de um resultado vai além da precisão dos dados experimentais a aplicação numérica significa exatamente a determinação do nada. Para exemplificar esta atração, Bachelard faz uma crítica aos manuais de geografia, os quais estão repletos de dados numéricos dos quais não se apresenta a variabilidade nem o campo de exatidão. Em particular, um destes manuais, para alunos de 16 anos, contém 3480 números, quase todos com o mesmo valor científico.

Essa sobrecarga numérica obriga os alunos a guardarem mais de 100 números por hora de aula. Isso é pretexto para uma pedagogia detestável, atentatória ao bom senso, mas que se mantém sem encontrar a mínima crítica em disciplinas que, de científicas, só têm o nome (BACHELARD, 2011, p. 266).

Como cada século tem sua própria escala de precisão, seu grupo de decimais, e seus instrumentos específicos, é possível determinar as diferentes etapas de uma ciência pela técnica que seus instrumentos revelam e identificar a dificuldade de determinar as primeiras condições das respectivas medidas.

A carência técnica observada no período pré-científico levou a uma surpreendente variedade dos primeiros instrumentos, variedade, esta, característica de uma ciência de amadores. Numa comunidade científica bem estruturada os instrumentos são quase imediatamente padronizados devido à clareza e o controle na busca da respectiva técnica, favorecendo a construção de um aparelho objetivo.

Considerando que um determinado fenômeno não oferece necessariamente à mensuração a variável mais regular, obstaculizando tanto o conhecimento objetivo comum, como o conhecimento instrumental primitivo, seu produto científico será bem definido à medida que os instrumentos se aperfeiçoam. Para Bachelard (2011, p. 268), “O conhecimento torna-se objetivo na proporção em que se torna instrumental”.

Modernamente é aceita a vinculação do conhecimento instrumental com a doutrina da sensibilidade experimental, de tal modo que antes de qualquer procedimento experimental o físico deve determinar a sensibilidade dos aparelhos. Tal vinculação, no conhecimento pré-científico não era considerada, bem como não eram consideradas as doutrinas do grande e do pequeno e dos erros experimentais.

O espírito pré-científico ao considerar as correlações totais dos fenômenos e postulando sobre determinismo, abusa das determinações recíprocas e repele de todas as formas a concepção contemporânea de sistema fechado com a argumentação da solidariedade do sistema fragmentado com o grande Todo. Segundo Bachelard (2011, p. 270), “Essa crença ingênua numa correlação universal, que é um dos temas prediletos de realismo ingênuo, surpreende ainda mais porque consegue reunir os fatos mais heterogêneos”.

Esta tentativa do pensamento pré-científico de salvar a continuidade e a solidariedade dos fenômenos fica evidente em vários exemplos da astronomia destacado por Bachelard no seu caminhar pela história do espírito pré-científico. “As propriedades astronômicas arrastam tudo; tudo vai para mesma escala”, Bachelard (2011, p.271).

Bachelard afirma que a astronomia desta época é um materialismo em toda a acepção da palavra, um materialismo totalitário baseado num determinismo geral, que revela com clareza a valorização atribuída a uma concepção unitária do Universo. Este espírito prefere a presunção à prova, o plausível ao possível.

Do espírito filosófico ao espírito científico observa-se a necessária redução do alcance do determinismo. Segundo Bachelard (2011, p.272), “é preciso afirmar que *tudo não é possível* na cultura científica e que só se consegue reter o possível, na cultura científica, daquilo de que se demonstrou a possibilidade”. Esta redução do alcance do determinismo nos leva a uma das características mais marcantes do espírito científico: o direito de desprezar que fundamenta o princípio da desprezabilidade. É importante salientar que tal princípio, aceito pela comunidade científica, encontra resistência no espírito filosófico, para o qual só se despreza aquilo que parece desprezível.

Uma prova positiva do princípio da desprezabilidade encontra-se no seu enunciado de forma não quantitativa: “Qualquer que seja o fenômeno considerado, sempre há um grande

número de circunstâncias que não têm influência mensurável sobre ele” (OSTWALD, p. 10, citado por BACHELARD, 2011, p. 273).

O desconhecimento das realidades de escalas destaca-se como obstáculo do conhecimento quantitativo na formação do espírito científico. Ao fazer os mesmos juízos experimentais do pequeno para o grande, e do grande para o pequeno, resistindo ao pluralismo de grandezas, necessário ao empirismo racional, e utilizando somente ideias simples de proporcionalidade podemos observar que o espírito pré-científico, de maneira ingênua, passa sem cerimônia de uma ordem de grandeza para outra.

Esta brevidade foi muito característica das cosmogonias do século XVIII, que eram capazes de explicar o mundo por simples referência a uma experiência costumeira, passando do pequeno para o grande, como por exemplo, do turbilhão produzido na água para a explicação do movimento dos planetas.

Com o advento do microscópio, que ampliou a experiência humana para o lado do infinitamente pequeno, o espírito pré-científico lança mão, sem sombra de prova e sem medida, de uma proporcionalidade biológica, para desvendar a profundidade desse infinito. Bachelard (2011, p. 276) destaca: “Exceto nos observadores de talento que superaram, com suas observações pacientes e incessantemente *repetidas*, o estado de deslumbramento inicial, as observações microscópicas deram origem aos mais incríveis juízos”. O outro infinito, aumentado pela invenção do telescópio, também passou por semelhantes dificuldades. No entanto, para o espírito pré-científico, o infinito do mundo macroscópico parecia ser aceito mais naturalmente que o infinito do mundo microscópico, devido a influências psicológicas, que demonstram, de certo modo, a valorização afetiva dada aos fenômenos afastados de nossa ordem de grandeza e a nítida resistência a abandonar a ordem de grandeza costumeira.

Atualmente estas resistências ao nível biológico e as tentativas de levar o humano às formas mais elementares da vida estão inteiramente reduzidas, mas, tais resistências, permanecem presentes no nível atômico:

Talvez a lembrança do êxito da objetividade biológica possa nos ajudar a vencer a atual resistência enfrentada pela objetividade atômica. O que entrava o pensamento científico contemporâneo — se não entre seus criadores, pelo menos entre os que se dedicam ao ensino — é o apego às intuições habituais, é a experiência comum tomada em nossa *ordem de grandeza*. É preciso abandonar hábitos. O espírito científico tem de aliar a flexibilidade ao rigor. Deve refazer todas as suas construções quando aborda novos domínios e não impor em toda parte a legalidade da ordem de grandeza costumeira (BACHELARD, 2011, p.277).

O emprego de imagens usuais, vagas e grosseiras, pelo conhecimento pré-científico, que impedem a matematização da experiência, leva este mesmo espírito a uma recusa de informações matemáticas discursivas em favor de uma forma de conjunto, de uma lei formulada em uma matemática vaga, que satisfaz a pouca necessidade de rigor das mentes sem nitidez.

Ainda neste estudo dos obstáculos do conhecimento quantitativo, Bachelard(2011, p. 281) coloca o tema da facilidade ou da dificuldade dos estudos como um aspecto primordial de um pensamento, pois tal dificuldade se traduz em verdadeiras opressões fisiológicas sobrecarregando de afetividade a cultura científica. Por outro lado, é esta mesma dificuldade que atrai os espíritos fortes, caracterizando sua ambivalência.

No meio científico do século XVIII era comum considerar a física mais fácil do que a geometria elementar, o que podemos perceber nas palavras do Padre Castel, citado por Bachelard (2011, p. 282):

A Física é, em si, simples, natural e fácil, quero dizer fácil de entender. Conhecem-se os termos, conhecem-se os objetos. De modo natural observamos e sentimos a maioria das coisas, a luz, o calor, o frio, o vento, o ar, a água, o fogo, a gravidade, a energia, a duração etc. Cada olhada é uma observação da natureza; cada operação de nossos sentidos e de nossas mãos é uma experiência. Todo mundo é um pouco Físico, mais ou menos de acordo com o espírito mais ou menos atento, e capaz de um raciocínio natural. Ao passo que a *Geometria* é toda abstrata e misteriosa *em seu objeto, em seus procedimentos, até em seus termos*.

Porém, segundo este mesmo autor, esta ordem de dificuldade pedagógica teria sido invertida com a ciência newtoniana, já que o cálculo integral era necessário para compreender o movimento dos astros e os fenômenos da luz, para ele esta inversão seria uma anomalia a ser corrigida. Sua obra busca recolocar a física no lugar que considera justo e bom, no seu aspecto fácil e imediato, contestando o matematismo newtoniano.

Bachelard destaca a séria vontade do pensamento pré-científico de separar a matemática da física como um quase *leitmotiv* do século XVIII, no qual a matemática não explicaria em nada os fenômenos em concordância com a teoria epistemológica segundo a qual a matemática *expressa*, mas não *explica*, ainda presente em nossa época.

A opinião de Bachelard (2011, p. 285) é contrária a esta teoria: “Contra essa teoria, achamos pessoalmente que o pensamento matemático forma a base da explicação física e que as condições do pensamento abstrato são doravante inseparáveis das condições da experiência científica”.

A sedução e a valorização inconsciente das formas geométricas presente tanto na história, como no ensino, é dissertada por Bachelard através do fenômeno do movimento keple-

riano. Para o espírito pré-científico, as elipses que os planetas descrevem são imaginadas a partir do círculo, cuja forma é pura, natural e muito valorizada. Alguns autores desta época acreditavam que as órbitas elípticas eram uma perturbação, resultado de um verdadeiro acidente, isto é, acidentes materiais produzindo acidentes astronômicos de tal modo que o que está mal feito no Céu é resultado do que está mal feito na Terra.

Para evitar o fascínio que as forma geométricas simples e fechadas exercem sobre as intuições substancialistas e animistas no ensino científico dos movimentos planetários é necessário explicitar como é feita sua produção algébrica, ligando, por cálculo discursivo, a realidade algébrica da atração ao fenômeno do movimento kepleriano e não somente ensinar o resultado, contentando-se com a afirmação de que os planetas descrevem elipses em torno do Sol colocado em um dos focos.

Sem dúvida, seria mais simples *ensinar só o resultado*. Mas o ensino dos *resultados* da ciência nunca é um ensino científico. Se não for explicada a linha de produção espiritual que levou ao resultado, pode-se ter a certeza de que o aluno vai associar o resultado a suas imagens mais conhecidas. É preciso "que ele compreenda". Só se consegue guardar o que se compreende. O aluno compreende do seu jeito. Já que não lhe deram as razões, ele junta ao resultado razões pessoais (BACHELARD, 2011, p. 289).

3.2 O RACIONALISMO APLICADO

O racionalismo, o empirismo, o materialismo e o realismo, embora insuficientes para explicar a ciência contemporânea, são considerados por Bachelard como perspectivas complementares e não excludentes, visto que, uma das características mais evidente do pensamento científico contemporâneo é a possibilidade de tal conhecimento ser dialetizado entre os campos teórico e experimental, gerando novos princípios que modificam constantemente o conhecimento.

Na dinâmica do pensamento científico através das retificações, rupturas e criação das teorias e colocando-se no campo intermediário entre a teoria e a prática, Bachelard postula um racionalismo aplicado que evidencia a dialética entre o material e o racional, entre o empírico e o teórico, que se atualiza na ação polêmica incessante da razão e que se contrapõe ao formalismo e ao fixismo de uma razão una e indivisível, defendendo a multiplicidade dos elementos

que estimulam e constituem a razão, a pluralidade das instâncias de pensamento e a reforma mútua dos conceitos e das experiências, num sentido oposto ao do racionalismo clássico.

O racionalismo aplicado é uma filosofia que continua e não uma filosofia que começa, pois os pontos de partida nos proporcionam, principalmente, preconceitos. Para Bachelard só se conhece contra ou apesar de, quando afasta-se dos conhecimentos anteriores. Todas as demais filosofias do conhecimento científico, ao se afastarem do duplo diálogo real-racional, não conseguem explicar o trabalho dos cientistas.

O racionalismo aplicado assume a função de ordenar as filosofias implícitas no conhecimento científico e caracterizar os sistemas filosóficos tradicionais. Frente ao racionalismo aplicado, o positivismo e o empirismo caminham progressivamente para o realismo, enquanto o formalismo e o convencionalismo se aproximam do idealismo. O racionalismo aplicado se coloca equidistante do realismo e do idealismo. É o compromisso da racionalidade com sua própria tradição, colocando a razão em processo de revolução permanente. O racionalismo aplicado é um racionalismo no qual o racional e o empírico se completam:

(...) o empirismo e o racionalismo estão ligados, no pensamento científico, por um estranho laço tão forte como o que une o prazer à dor. Com efeito, um deles triunfando razão ao outro: o empirismo precisa ser compreendido; o racionalismo precisa ser aplicado. Um empirismo sem leis claras, sem leis coordenadas, sem leis dedutivas não pode ser nem pensado, nem ensinado; um racionalismo sem provas palpáveis, sem aplicação à realidade imediata não pode convencer plenamente. Prova-se o valor real de uma lei empírica fazendo dela a base de um raciocínio. Legitima-se um raciocínio fazendo dele a base de uma experiência. A ciência, soma de provas e de experiências, soma de regras e de leis, soma de evidências e de factos, tem pois necessidade de uma filosofia com dois polos. Mais exactamente ela tem necessidade de um desenvolvimento dialéctico, porque cada noção se esclarece de uma forma complementar segundo dois pontos de vista filosóficos diferentes (BACHELARD, 1984, p.9).

O racionalismo aplicado é dialéctico em sua atividade, porque a ciência se constrói num processo de retificação constante, tanto de seus princípios, como de suas matérias. Bachelard (1977, p.16) afirma que a ciência “é dialéctica, não apenas no pormenor dos seus processos, mas ainda no duplo ideal de sua coerência teórica e de seu rigor experimental”.

Ao impedir a manutenção da dicotomia existente no pensamento filosófico tradicional, entre as formulações teóricas e os processos experimentais, a dialéctica do pensamento Bachelardiano permite que a epistemologia adquira a mobilidade característica da ciência, visto que o racionalismo aplicado detém a possibilidade de retificar-se, através de um contínuo processo de aproximações.

Para fundamentar suas teses, essencialmente polêmicas, Bachelard constrói diversos instrumentos teóricos. As ideias *presentes*, ratificadas pelas ciências contemporâneas, são as ideias segundo as quais o pensamento racional opera. Este procedimento epistemológico, sempre atual, permite a organização racional das ideias adquiridas, as quais são elaboradas de forma metódica, não se limitando a meras aquisições. A *memória racional* permite lembrar os valores dominantes de uma cultura continuamente instruída.

O racionalismo aplicado aceita uma ideia como clara, em função da associação das ideias, que se dialetizam e se confirmam. Em Bachelard (1977, p.44), a ideia “adquire sua riqueza em razão de circular, de suas relações com outras ideias, de sua intromissão em construções cada vez mais numerosas, sejam técnicas ou teóricas – sempre racionais. Não há nada claro senão relações”.

No racionalismo científico, as noções científicas devem ser submetidas a uma prova de valor sendo sistematicamente desdobradas para a verificação de sua provável evidência, tanto na aplicação técnica como na pertinência teórica. Essa verificação procura perceber a possibilidade de intercâmbio entre a teoria e, a técnica e o valor filosófico das noções. O racionalismo aplicado não se limita a apenas uma dimensão filosófica das noções: somente empírica; ou somente racional. Propõe um poli filosofismo, em movimento dialético entre a preparação racional das teorias e as técnicas utilizadas na sua comprovação. A coerência das noções científicas é fundamental para a verificação do verdadeiro saber racional. Segundo Bachelard:

A coerência nunca é simples verificação da coesão. Ou, mais exatamente, o par coerência-coesão formula-se pela integração do ponto de vista da coerência na descrição de uma coesão. Essa coerência integrada pela qual um espírito compreende e pode fazer que outro espírito compreenda a coesão, eis o ato mesmo do racionalismo, o ato racionalista (BACHELARD, 1984, p. 51).

Assim, a coerência das noções permite uma coexistência das mesmas, criando um paralelo entre o empirismo e o racionalismo, onde os valores da coerência tomam como suporte a hierarquia superior da informação racionalista que controla as atividades do pensamento.

O sujeito em Bachelard é aquele que constrói em si dois movimentos constantes, pois é um sujeito dividido num *eu* e num *tu*, que dialetizam o conhecimento, engajado numa história essencialmente inacabada, impondo para cada noção, diante de cada objeto, uma dúvida apropriada, *uma dúvida aplicada*. Este é, então, o sujeito racionalista.

A intuição primeira que caracteriza a construção do conhecimento do sujeito do racionalismo clássico é, aqui, substituída pela implantação de uma pedagogia das noções científicas.

cas que, dialetizadas no próprio sujeito, assume a função polêmica de ensino. É um movimento de retificação do saber que se problematiza objetivamente, um conhecimento fundamentado numa maior racionalização do objeto.

A realidade social sobre a qual a epistemologia trabalha é, segundo Bachelard (1977, p.51), uma realidade já informada pela ciência e tal realidade é, ao mesmo tempo, experiência sobre o pensamento científico. Tal experiência, revestida do racionalismo aplicado é própria para confirmar discursivamente uma existência, simultaneamente, no objeto e no sujeito. Isto caracteriza o racionalismo aplicado como uma filosofia que continua, que pensa no objeto científico como algo já constituído, a ser retificado, a ser repensado.

Então, para conhecer é necessário uma atitude metodológica: provocar a discursividade do sujeito e do objeto. A experiência requer um método que seja um instrumento teórico preciso e isto é alcançado com o ajuste do método para conhecer com o objeto a conhecer, podendo, inclusive ser modificado pelo objeto. A dialética mobiliza o método valorizando as relações de conhecimento.

No pensamento bachelardiano, o objeto assume uma dupla representação que aclara seu rigor em consonância com um pensamento rigoroso: a *consciência de método objetivo* e a *consciência de exata aplicação*. O sujeito, dividido dialeticamente, constrói um pensamento rigoroso e implanta uma discursividade fecunda entre o método e o objeto do conhecimento.

Em Bachelard a questão do método epistemológico é essencial. O sujeito do conhecimento não pode aceitar o método como hábito sem vigor teórico necessário para alcançar o objeto. O método deve ser polêmico para assim constituir-se adequadamente nos objetivos das ciências. Mobilizado pela dialética, o método busca aclarar a dúvida especificada pelo objeto. Sobre o método, diz Bachelard:

É preciso que um novo caso confirme um método de instrução, ou bem o enfraqueça e, por conseguinte, o dialetize. [...]. E sempre o conhecimento é tomado no par do racionalismo aplicado: é preciso sempre que um fato julgue um método: é preciso sempre que um método tenha sanção de um fato (BACHELARD, 1977, p. 78).

Dada a necessidade de vigilância do próprio método, Bachelard desenvolve a tese epistemológica da *vigilância intelectual em si*, que caracteriza a consciência de um sujeito que tem um objeto, onde o método é valorizado por apreender.

Esta vigilância acontece num desdobramento objetivo, promovendo o racionalismo aplicado a instâncias superiores do pensamento científico, transformando-se na vigilância da

vigilância, que objetiva a uma consciência maior da aplicação do método que opera nos dois extremos do empirismo e do racionalismo.

A vigilância duplicada que surge da psicanálise desses dois polos, não permite o surgimento de conceitos absolutos e radicais, não permite, também, o surgimento de princípios filosóficos estranhos à realidade das ciências. A absolutização do pensamento científico no pensamento filosófico é a negação da autonomia das ciências e dos próprios métodos para conhecê-las. Bachelard, ainda, destaca a necessidade de vigiar, além da aplicação do método, o próprio método. É a vigilância elevada ao cubo, que colocará o próprio método a prova exigindo que se arrisquem na experiência as certezas racionais, ou que sobrevenha uma crise de interpretações de fenômenos devidamente constatados.

Neste momento teórico, Bachelard depura mais acentuadamente a sua análise crítica do conhecimento científico. Com uma vigilância altamente racionalizada propõe o questionamento crítico das próprias normas da razão, criticando a cultura dada pelo ensino tradicional, criticando a cultura normalizada pela razão e criticando a história da racionalização dos pensamentos.

A vigilância intelectual de si leva o sujeito do conhecimento a um estado de prontidão permanente, tanto nas manifestações atuais do pensamento científico, tanto na sua forma pedagógica, com a verificação do ensino de ciências, como na sua normalização racional. A cultura vigiada, por recorrência, se refaz na sua história, ordenando o conhecimento acumulado. Esta história refeita não corresponde absolutamente à história efetiva.

Na epistemologia bachelardiana a vigilância assume todo vigor polêmico necessário ao racionalismo aplicado, não permitindo mais a possibilidade de aplicação de métodos absolutos, pois ele julga o método como um momento do progresso do próprio método. O método não pode mais ser fixista e nem determinar os modos definitivos de alcançar o objeto do conhecimento. Ele não é dotado de um finalismo utilitário, ele tem a finalidade racional junto às normas da razão, dando-lhes uma razão dialética.

Em Bachelard o racionalismo aplicado, por princípio epistemológico, se apresenta como uma filosofia que trabalha, que retifica os valores do conhecimento, numa constante atualização de seus pressupostos afeitos à cultura científica. O pensamento racional é um pensamento de reorganização, que se organiza e se reorganiza a partir de uma razão fundamentada do desenvolvimento contemporâneo da ciência. No racionalismo aplicado se desenvolve uma característica epistemológica gerada a partir da época contemporânea marcada pelas re-

voluções científicas, denominada por ele de *ruptura epistemológica*, que permite o rompimento entre o conhecimento comum e o conhecimento científico.

A ruptura epistemológica se justifica pelo fato da ciência contemporânea apresentar fenômenos tecnicamente construídos que simplesmente não existem na natureza e, que não apresentam características de continuidade com os fatos naturais. A ideia de continuidade se perde quando o progresso do conhecimento é evidente e decisivo. Desta forma, a nova cultura científica determina a reforma do conhecimento, que se apresenta como descontínuo em seus avanços dado o avanço das técnicas científicas que constroem fenômenos sem similares na natureza. Deste modo, o princípio da identidade entre o pensamento e a realidade, fundamental ao conhecimento comum, já não tem mais sentido.

O objeto do conhecimento é outro aspecto importante que fundamenta a ruptura epistemológica:

O objeto percebido e o objeto pensado pertencem a duas instâncias filosóficas diferentes. Pode-se, então, descrever o objeto duas vezes: uma vez como o percebemos; e uma vez como o pensamos. O objeto é, no caso, fenômeno e noumeno. E, na medida em que é noumeno, está aberto a um futuro de aperfeiçoamento que o objeto do conhecimento vulgar não possui absolutamente. O noumeno científico não é simplesmente essência; é um progresso do pensamento (BACHELARD, 1977, p. 130).

A ruptura entre a percepção do fenômeno e a construção teórica é necessária visto que a percepção acontece como uma simples multiplicação do percebido, sem trazer novos elementos que possam favorecer à evolução do conhecimento enquanto que, o noumeno científico implica um esclarecimento teórico que traz a marca de um progresso do conhecimento.

Em Bachelard o conhecimento científico se desdobra numa multiplicação da realidade, criando áreas específicas, setores particulares do trabalho científico. Desta forma, o racionalismo aplicado desenvolve os *racionalismos regionais* indispensáveis ao exame dos setores particulares da experiência científica, cuja função ativa é a verificação do saber científico numa conexão direta com o mundo fenomenal.

Ao tratar dos racionalismos regionais, Bachelard destaca a necessidade de um racionalismo geral que assuma os racionalismos regionais, denominado por ele de *racionalismo integral* ou *racionalismo integrante*.

Esse racionalismo integral ou integrante deveria ser instituído a *posteriori*, depois de estudados os racionalismos regionais diversos, tão organizados quanto possível, contemporâneos do relacionamento dos fenômenos que obedecem a tipos de experiências bem definidos (BACHELARD, 1977, p.151).

O racionalismo regional, como uma estrutura a ser trabalhada teoricamente, é definido socialmente, por uma objetivação teórica a partir do consenso proveniente de comunidades de pensadores. O racionalismo integral assume a função dialética de pensar a estrutura, de decidir qual estrutura aplicada ao pensamento para informar uma experiência, caracterizando, mais uma vez, a constituição dialética da epistemologia de Bachelard.

As estruturas trabalhadas na epistemologia passam a assumir um papel teórico importante, pois as mesmas tendem a multiplicar-se numa determinação de operar com um vasto campo axiomático coerente com a amplitude do campo experimental. Segundo Bachelard:

[...]. Um dos caracteres mais novos da epistemologia contemporânea é que as diferentes aproximações experimentais do real se revelam solidárias com a modificação axiomática das organizações teóricas. O racionalismo integral só poderá ser, portanto, um domínio das diferentes axiomáticas de base. E ele designará o racionalismo como uma atividade de dialética, visto que as axiomáticas diversas se articulam entre si dialeticamente (BACHELARD, 1977, p.156).

O processo dialético instaurado pela epistemologia capta as variações de sentido das diversas estruturas e os racionalismos regionais passam a se constituir como atividades racionais capazes de acompanhar o pensamento científico contemporâneo em sua grande variação teórica.

Portanto, o racionalismo regional se constitui num pensamento especializado polêmico, seguro, melhor compreendendo as estruturas a serem por ele aplicadas. Em todos os níveis mantém-se em estreita dialética com o racionalismo integral, enriquecendo-o com sua atividade e oferecendo uma maior garantia para a objetividade, pois um pensamento dialetizado é um pensamento submetido à reflexão intersubjetiva da comunidade epistemológica. A negação da reflexão solitária do sujeito diante do objeto científico dá ao conhecimento a garantia de não constituir-se num racionalismo absoluto.

3.3 BACHELARD E O REALISMO

Bachelard (2011, p.163) considera o **realismo** como única filosofia inata, que orienta o pensamento do senso comum e capaz de constituir a ciência do geral, do superficial, supervalorizando as impressões tácteis e visuais. Para o realista o objeto percebido, imediatamente captado pela experiência empírica, cuja constatação está isenta da dimensão construtiva teórica, é a razão de ser do conhecimento. O realista não ultrapassa o dado imediato e concreto,

não ultrapassa o conhecimento de primeira instância. A razão do realista não encontra espaço para se aplicar, pois todo seu ser resiste à abstração.

Segundo Bachelard (2011, p.164), todo realista é um avarento e todo avarento é um realista, o que se percebe na argumentação de um realista:

Imediatamente ele está em vantagem sobre o adversário porque tem, acha ele, o real do seu lado, porque *possui a riqueza* do real, ao passo que seu adversário, filho pródigo do espírito, persegue sonhos vãos. Em sua forma ingênua, em sua forma afetiva, a certeza do realista provém de uma alegria avarenta (BACHELARD, 2011, P.164).

Para Bachelard (2001, p.164), em uma terapia do substancialismo, através de uma psicanálise do sentimento de ter, o complexo a ser desfeito é o complexo do pequeno lucro.

Tal complexo ao inflacionar um tipo de conhecimento particular, valorizando matérias e qualidades, constitui obstáculo à cultura científica e é no próprio ato de conhecer que se deve detectar o distúrbio produzido pelo sentimento predominante do ter.

Para Bachelard o conhecimento científico é um conhecimento de segunda aproximação, mas não se encontra pronto na natureza, aguardando o momento de sua revelação. É sim um conhecimento em construção que exige uma aplicação da razão à técnica, em constante processo de elaboração, não estando, portanto, oculto. Bachelard considera que o conhecimento se produz por constantes retificações dos dados primeiros e que o conhecimento não está no objeto.

De modo diferente, o melhor e o de mais valor, para o realista, é o mais oculto. O realista supervaloriza o objeto, considera que o conhecimento está no objeto, o qual precisa apenas ser apreendido.

O realismo mantém-se preso ao dado primeiro, bloqueia as retificações necessárias à construção do conhecimento científico, sobrepõe metáforas diante do conhecimento abstrato, descarta a racionalização que constrói os conceitos, constitui imagens para descrever o objeto e apresentar suas prioridades, encaradas como fundamentalmente intrínsecas a ele, distorcendo, neste processo o real construído em nome do real factual.

A estratégia pedagógica do realista consiste em apresentar os conceitos racionais como formas a serem descritas, utilizando generalizações apresadas e inadequadas, apoiando-se apenas sobre os dados dos sentidos, descrevendo apenas o aspecto geral, mascarando e obstaculizando a compreensão dos aspectos matemáticos dos fenômenos, transmitindo, desta forma, o engano e o equívoco.

Para Bachelard (1984, p.24), “a utilização de uma dialética ao nível do realismo é sempre incerta e provisória”.

O procedimento dialético do conhecimento teórico do real está estruturado num conceito animista traduzido em poucas palavras, esvaziando desta forma o verdadeiro sentido da proposição, tornando-se elemento fácil de ensinar e conseqüentemente inexato. Uma noção, cujo emprego está tipificado numa determinação objetiva e precisa, conduz, segundo Bachelard (1984, p.173), os conceitos empíricos a uma organização pragmaticamente segura, mas mal concebidos e mal articulados racionalmente.

As filosofias realistas, a partir dos dados da percepção, delimitam seu campo especulativo no imediato, no mundo fenomenal que circunscreve o sujeito. Este sujeito, eminentemente subjetivo, está colocado nos enunciados desenvolvidos pelas teorias realistas. O tratamento rigoroso utilizado pelos realistas para legitimar o caráter supostamente científico do desenvolvimento de suas teses, nada mais fazem do que travestir a linguagem vulgar, mantendo, no entanto, implicitamente as informações do real imediato. Isto é, o tratamento dado ao objeto não é alterado pelo sujeito do conhecimento, pelo simples fato de utilizar-se um discurso de linguagem rigorosa.

A realidade objetiva estará sempre condicionada ao tratamento subjetivo do sujeito, tornando-se “então objeto de curiosas valorizações a que os mais diversos devaneios animistas dão livre expansão. Neste estágio, a noção [...] é um conceito obstáculo. Este conceito bloqueia o conhecimento; não o resume” (BACHELARD, 1984, p.23).

Os conceitos obtidos a partir do aparente rigor de determinados instrumentos e que dizem respeito às condutas realistas, tendem fixar parâmetros simplistas aparentemente claros. A partir de tais princípios do pensamento empírico, torna-se mais evidente a debilidade das teorias realistas, imediatas e efêmeras, que têm sua operacionalização estruturada numa dialética prematura das coisas.

Bachelard (1984, p.26) destaca que

Um pensamento empírico associado a uma experiência tão peremptória, tão simples, recebe então o nome de pensamento realista”. [...] Mesmo numa ciência avançada, as *condutas realistas* subsistem. Mesmo numa prática inteiramente comprometida com uma teoria se manifestam retornos a condutas realistas. Estas condutas realistas reinstalam-se porque o teórico racionalista tem necessidade de ser compreendido por simples experimentadores, porque ele quer falar mais depressa regressando conseqüentemente às origens animistas da linguagem, porque ele não teme o perigo de pensar simplificando, porque na sua vida comum ele é efetivamente realista (BACHELARD, 1984, p.26).

Da crítica de Bachelard ao empirismo, principalmente ao tratamento dado ao conhecimento, emerge um processo que envolve as relações do sujeito e do objeto em um campo teórico fundamental que, no entanto, não se constitui num determinismo empirista.

O processo empirista do conhecimento se dá basicamente na operação do sujeito denominada abstração. Nessa perspectiva, conhecer é abstrair a essência do objeto real, isto é, a posse do objeto real pelo sujeito, determina o conhecimento.

A abstração real é tomada como um fato real. A essência do objeto real refere-se a uma essência concreta, abstraída, extraída da essência do real que contém o objeto, num processo de desocultação, de desvelamento da realidade concreta dada.

Para o empirismo, ao considerar o objeto real como aquele que contém a essência a ser abstraída, o objeto constitui-se duas partes distintas: a parte essencial e a parte inessencial. O inessencial é constituído pela parte do real que ocupa toda a exterioridade do objeto, na sua superfície visível, enquanto que a parte essencial ocupa o interior do objeto, seu núcleo invisível.

Desta forma o conhecimento, na concepção empirista, tem a função única de separar as duas partes constitutivas do real, buscando eliminar o real inessencial para deixar o sujeito frente à segunda parte do real, que é a sua essência, também real.

A teoria empirista, opondo-se ao que postula Bachelard, vê o seu objeto como algo dado, já construído, mas que, no entanto, não é um dado imediato, límpido. É um objeto cuja essência tem um véu que a recobre e que será desvelado pela abstração, fazendo, então, emergir a presença real da essência cujo conhecimento não é mais a simples visão.

Tal concepção empirista do conhecimento, vinculando o sujeito ao objeto real, nos conduz a um impasse, a um obstáculo, visto que a essência é apenas uma das partes reais do objeto real. Ao considerar o real e somente o real, o conhecimento assim constituído caracteriza uma parada do pensamento, pois ao buscar o essencial do objeto real, busca um marco definitivo, estático.

Para Bachelard, o realismo é definitivo por não ter a atualidade que exige o pensamento científico:

Amiúde o filósofo, que se vale do caráter concreto de sua experiência, não se dá conta de que as primeiras tomadas sobre o real não são mais que pobres abstrações. A impressão concreta primeira é finalmente uma prisão estreita, onde o espírito perde a sua liberdade, onde a experiência se priva da extensão necessária ao conhecimento afinado com a realidade (BACHELARD, 1976, p. 28).

3.4 BACHELARD, O PROFESSOR

Para superar a supremacia observada na história científica da imagem resultante em relação ao cálculo que deve explicá-la, Bachelard, o professor, sugere lutar contra a valorização das imagens geométrica habituais colocando-as em relação com famílias de imagens mais gerais, buscando generalizações objetivas através da evasão das imagens individuais. Recomenda, também, as inversões da ordem construtiva alternativamente, tirando a lei da forma empírica e reconstruindo a forma pura com apoio na lei. Essa inversão sugerida, do ponto de vista psicológico, deve atuar como estímulo para reiterar o exercício psicológico da análise e das sínteses recíprocas, nos dois sentidos, evitando desta forma que o espírito se habitue a um procedimento preferido e valorizado, deve, também, corrigir a tendência ao repouso intelectual de quem pratica a intuição, bem como, desenvolver o hábito do pensamento discursivo.

Nesta perspectiva Bachelard destaca da sua atuação como professor:

Pouco a pouco, procuro liberar suavemente o espírito dos alunos de seu apego a imagens privilegiadas. Eu os encaminho para as vias da abstração, esforçando-me para despertar o gosto pela abstração. Enfim, acho que o primeiro princípio da educação científica é, no reino intelectual, esse ascetismo que é o pensamento abstrato. Só ele pode levar-nos a dominar o conhecimento experimental. Por isso, não hesito em apresentar o rigor como uma psicanálise da intuição, e o pensamento algébrico como uma psicanálise do pensamento geométrico. Até no reino das ciências exatas, nossa imaginação é uma sublimação. É útil, mas pode enganar se não sabemos o que se sublima e como se sublima. Ela só serve se seu princípio for psicanalisado. A intuição nunca deve ser um dado. Deve sempre ser uma ilustração (BACHELARD, 2011, p. 292).

O espírito científico ao superar os diversos obstáculos epistemológicos constitui-se como um conjunto de erros retificados, no entanto, o grupo de verdades obtidas contra estes erros não oferece um domínio bem homogêneo e harmonioso da verdade, não formam, necessariamente, uma doutrina completa da atitude objetiva.

Ao contrário do filósofo que se destaca em generalização, o cientista tornou-se um especialista que busca a síntese de sua especialidade, não aceita como pensamento objetivo um pensamento que ele mesmo não o tenha objetivado. Desta forma o problema da objetividade, dado que não há verdade sem erro retificado, não é filosófico, mas sim, psicológico. Para Bachelard (2011, p.293), “a psicologia da atitude objetiva é a história de nossos erros pessoais”.

Bachelard, ao buscar reunir os elementos gerais de uma doutrina do conhecimento do objeto, parte do seguinte postulado epistemológico: o objeto não pode ser designado como um “objetivo”, visto que, o caminho para o objeto não é inicialmente objetivo.

Destaca-se, aqui, a necessidade de ruptura entre o conhecimento sensível e o conhecimento científico, superando o pragmatismo e o realismo imediato do primeiro conhecimento que, em geral, nos dá um falso ponto de partida indicando-nos uma direção errada, pois, a adesão imediata de um objeto concreto, como um bem, como um valor, pelo conhecimento sensível, trata-se, mais de uma satisfação íntima do que uma evidência reacional. Através desta satisfação íntima, ainda na forma de estímulo, o conhecimento sensível formula a primeira objetividade, a qual não corresponde, ainda, a nenhum estágio do espírito científico, pois a psicologia de tal estímulo nunca chega sistematicamente à psicologia do controle objetivo.

O controle aqui destacado deve ser entendido como frenagem do estímulo devido ao fracasso do conhecimento sensível, eliminando o valor de tal estímulo. Para Bachelard (2011, p.295) “o homem que pensa nunca se enganar estaria enganado para sempre”.

Os erros da experiência primeira poderiam ser eliminados pelo comportamento e o conhecimento científico teria como primeiro passo o conhecimento sensível tornado coerente por um comportamento. No entanto tal conciliação manteria a impureza original do estímulo que não foi corrigida pelas repreensões do objeto, os valores continuariam ligados aos objetos primeiros e o compromisso do conhecimento sensível permaneceria, deste modo, falho.

Para eliminar o estímulo da base de nossa objetivação e para garantir que o controle objetivo seja, de fato, uma reforma, Bachelard propõe o controle social e que a objetividade seja fundada no comportamento do outro, isto é, através do olho do outro que veremos a forma abstrata do fenômeno objetivo. “Dize-me o que vês e eu te direi o que é”, Bachelard (2011, p. 295). Deste modo teremos alguma garantia de que efetivamente fizemos a abstração necessária de nossas primeiras ideias.

As doutrinas de objetividade, de uma forma ou de outra, acabam sujeitando o conhecimento do objeto ao controle do outro. Em geral este controle do outro se dá após a construção objetiva realizada por um espírito solitário, entregue ao seu trabalho, sem levar em conta a coesão de seus materiais nem a coerência de seus projetos. Diferentemente, Bachelard propõe um controle que inicia com uma dúvida prévia que atinge tanto os fatos quanto as suas ligações, tanto a experiência quanto a lógica, determinando as condições primitivas do conhecimento objetivo já no momento em que o espírito científico designa o seu objeto.

Bachelard reconhece que a ciência moderna trabalha com materiais experimentais e com quadros lógicos já socializados e, portanto, já controlados, onde o instrumento de medida acaba sendo já uma teoria, um prolongamento do espírito.

Assim, a precisão discursiva e social destrói as insuficiências intuitivas e pessoais. Quanto mais apurada é a medida, mais indireta ela é. A ciência do solitário é qualitativa. A ciência socializada é quantitativa. A dualidade Universo e Espírito, quando examinada no âmbito de um esforço de conhecimento pessoal, aparece como a dualidade do fenômeno mal preparado e da sensação não retificada. A mesma dualidade fundamental, quando examinada no âmbito de um esforço de conhecimento científico, aparece como a dualidade do aparelho e da teoria, dualidade já não em oposição mas em recíprocas (BACHELARD, 2011, p. 297).

Para Bachelard é através da confissão de nossas falhas intelectuais, eliminando o orgulho das certezas gerais e a cupidez das certezas particulares, que o processo da operação objetiva da consciência do erro íntimo e primeiro começa, iniciando, assim, o processo de retificação discursiva, processo fundamental do conhecimento objetivo.

Destacamos que os erros a serem retificados através deste processo de retificação discursiva não se referem aos erros oriundos de afirmações gratuitas, feitas sem nenhum esforço de pensamento e que, de fato, não são erros propriamente ditos, pois seu entendimento não serviria para nada, mas, sim, o erro positivo, o erro normal, o erro útil, cujo motivo aumenta o alcance da psicanálise do conhecimento.

A necessidade de determinar o espírito científico em abstrações cada vez mais apuradas, eliminando os erros cada vez mais capciosos exige sociedades científicas complexas, nas quais se destaca, além do esforço lógico, o esforço psicológico. As qualidades de objetividade são mais desenvolvidas na sociedade moderna, que professa o valor educativo da ciência do que nas sociedades de períodos menos escolarizados, isto é, na medida em que uma determinada ciência se torne social, fácil de ensinar, ela conquista bases objetivas.

No que tange a objetividade do conhecimento científico no ambiente escolar devemos estar atentos a algumas características deste ambiente. Na escola o ambiente jovem é mais formador do que o velho; os colegas mais importantes do que os professores que apresentam conhecimentos efêmeros e desordenados, marcados pelo signo da autoridade. Assim, os alunos assimilam instintos indestrutíveis como o instinto de originalidade e não o instinto de objetividade social que daria a eles, como grupo, a consciência de uma razão de grupo.

Em outros termos, para que a ciência objetiva seja plenamente educadora, é preciso que seu ensino seja socialmente ativo. É um alto desprezo pela instrução o ato de instaurar, sem recíproca, a inflexível relação professor-aluno. A nosso ver, o princípio *pedagógico* fundamental da atitude objetiva é: *Quem é ensinado deve ensinar*. Quem recebe instrução e não a transmite terá um espírito formado sem dinamismo nem autocrítica. Nas disciplinas científicas principalmente, esse tipo de instrução cristaliza no dogmatismo o conhecimento que deveria ser um impulso para a descoberta. Além disso, não propicia a experiência psicológica do erro humano (BACHELARD, 2011, p. 300).

Ainda no ambiente escolar é possível observar a dualidade psicológica das atitudes racionalista e empírica, como destaca Bachelard (2011, p. 301), “uma lição recebida é psicologicamente um empirismo; uma lição dada é psicologicamente um racionalismo”. Todo ensino científico de um conhecimento objetivo está, também, sujeito ao fluxo e refluxo do empirismo e do racionalismo no contínuo diálogo entre o espírito e as coisas que constituem tal conhecimento, satisfazendo, desta forma a necessidade de dinamismo psicológico da cultura em questão. Para Bachelard (2011, p. 303), “toda filosofia que limite a cultura ao Realismo ou ao Nominalismo representa os mais terríveis obstáculos para a evolução do pensamento científico”.

Para esclarecer esta polêmica entre o racionalismo e o empirismo é necessário determinarmos o que de fato se entende por satisfação da razão quando ela racionaliza um fato, bem como discutir a psicologia do sentimento de ter razão, já que para o homem, no exercício social de suas convicções racionais, não basta ter razão, ele precisa ter razão contra alguém. Para conhecer toda afetividade do uso da razão:

É preciso viver a cultura científica, ensiná-la, defendê-la das ironias e incompreensões; é preciso, com a ajuda dessa ciência, provocar os filósofos, os psicólogos do sentimento íntimo, os pragmatistas e o realista! Será então possível julgar a escala de valores do sentimento racional: vencer a resistência dos homens pelos homens, doce vitória na qual se compraz os desejos de poder dos homens políticos! Vencer a resistência dos homens pelas coisas é, porém, o verdadeiro êxito no qual triunfa, não mais o desejo de poder, mas a luminosa vontade da razão, *der Wille zur Vernunft* (BACHELARD, 2011, p. 303).

As coisas, no entanto, nunca dão razão ao espírito de modo global e definitivo e essa satisfação racional deve ser constantemente renovada. Tal dinamismo psíquico evitará o desgaste das verdades racionais que apresentam a tendência de perderem a apodicticidade e a tendência de tornarem-se hábitos intelectuais e, desta forma, evitando a perda do senso da novidade espiritual, como prática pedagógica constante, inquietar a razão e desfazer os hábitos do conhecimento objetivo. Esta interferência do desejo de poder no educador científico demonstra uma ponta de sadismo na sua atitude do professor.

É possível perceber, também, certo masoquismo intelectual na necessidade do mistério que está por trás das soluções científicas mais claras, na necessidade de postular um realismo. A tranquilidade de um conhecimento bem fechado em si mesmo não satisfaz o espírito científico.

Essas tendências sádicas ou masoquistas são os primeiros obstáculos que o cientista solitário tem de superar para atingir a estrita objetividade científica. Já o cientista contemporâneo vê-se diante da necessidade de renunciar à sua própria intelectualidade em favor de um despojamento da intuição e abandonando, também, suas imagens preferidas para garantir a fecundidade da pesquisa objetiva e o ímpeto indutivo, vetor da descoberta. Enfim, para manter-se em estado nascente de objetivação é necessário um esforço constante de dessubjetivação, oscilando entre a extroversão e a introversão na mente liberada psicanaliticamente das duas escravidões, a do sujeito e a do objeto. Uma descoberta objetiva é logo uma retificação subjetiva no sentido de que o objeto, ao instruir, ele modifica o espírito.

Pela psicanálise do pragmatismo obtém-se a mudança psicológica: do saber para utilizar para o saber para poder saber. Desta forma, por essa modificação essencial, como uma complicação no plano matemático, retorna-se ao objeto. À experiência e à técnica cabe ilustrar e realizar esta modificação, a qual já foi realizada psicologicamente. Esta mudança psicológica, esta modificação essencial, no entanto, encontrará resistências, para de fato se instaurar:

Sem dúvida o mundo costuma resistir, o mundo resiste sempre, e é preciso que o esforço matematizante se corrija, se amolde, se retifique. Mas ele se retifica enrijecendo-se. De repente, a eficácia do esforço matematizante é tal que o real se cristaliza nos eixos oferecidos pelo pensamento humano: novos fenômenos se produzem. Pois é possível falar sem hesitação de uma criação dos fenômenos pelo homem. (...)Essa *realização* fenomenológica produziu-se num ponto preciso da maturidade matemática e técnica. (...)O homem vence assim as contradições do conhecimento imediato. Ele força as qualidades contraditórias à consubstanciação, a partir do instante em que ele próprio se libera do mito da substancialização. Já não há irracionalismo numa substância cuidadosamente fabricada pela química orgânica: esse irracionalismo seria apenas uma impureza. Impureza que pode, aliás, ser tolerada. Se é tolerada, é porque é ineficaz, não oferece perigo. Funcionalmente, essa impureza não existe. Funcionalmente, a substância realizada pela síntese química moderna é totalmente racional (BACHELARD, 2011, p. 305).

Destacamos, que tais mudanças psicológicas, mesmos as mais decisivas exigidas pela ciência, não eliminam completamente as influências dos interesses e dos instintos. Para Bachelard (2011, p. 307), o pensamento científico, apesar disto, é psicologicamente formador, visto que o pensamento abstrato e matemático prolonga a técnica, visto que o pensamento

científico reforma o pensamento fenomenológico, numa ciência contemporânea que reflete sobre a reflexão.

O pensamento objetivo se desenvolve mesmo em contato com o mundo das sensações apesar de ser corrente, na ciência a partir do século XX, que o pensamento científico começa contra as sensações e que o objetivo deva ser dar contra o objeto, resistindo não ao primeiro reflexo, mas resistindo sim à primeira reflexão, numa clara ação cerebral.

No entanto, para Bachelard (2011, p. 307), o cérebro, como coordenador de gestos e apetites, já não é o instrumento absolutamente adequado do pensamento científico, é, sim, um obstáculo para esse pensamento. “É preciso pensar *contra* o cérebro”.

Assim, para que a ciência seja fundamentada num racionalismo objetivo, a psicanálise do pensamento científico: deve tratar o passado intelectual e o passado afetivo como, efetivamente, passado; as linhas de inferência que levam a ideias científicas devem ser traçadas a partir de sua origem afetiva; o dinamismo psíquico que percorre estas linhas deve ser constantemente vigiado; todos os valores sensíveis devem ser depreciados; o antigo deve ser pensado em função do novo, escrevendo a história do que deveria ter acontecido ao lado da história do que aconteceu.

Esta história, falsa socialmente no arroubo da ciência popular que ela descreve, mas verdadeira nas suaves solicitações da verdade objetiva, determina a linha tênue entre o interesse pela vida e o interesse pelo espírito, entre a utilidade para a vida, que a imobiliza, e a utilidade para o espírito, que o coloca em movimento. Ao caminhar sobre esta linha observa-se que o interesse pela vida é suplantado pelo interesse pelo espírito e a psicanálise do espírito científico deve, também, distinguir esses dois contrários, a ruptura da solidariedade do espírito com os interesses vitais, no campo da biologia e no campo da psicologia do pensamento científico.

Esta psicanálise do conhecimento objetivo pode e deve ser estendida à realidade escolar indo, além dos programas escolares, até as realidades psicológicas, integrando a ciência na cultura geral. Nesta perspectiva Bachelard defende o princípio da cultura contínua:

Na obra da ciência só se pode amar o que se destrói, pode-se continuar o passado negando-o, pode-se venerar o mestre contradizendo-o. Aí, sim, a Escola prossegue ao longo da vida. Uma cultura presa ao momento escolar é a negação da cultura científica. Só há ciência se a Escola for permanente. É essa escola que a ciência deve fundar. Então, os interesses sociais estarão definitivamente invertidos: a Sociedade será feita para a Escola e não a Escola para a Sociedade (BACHELARD, 2011, p. 309).

4 ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICO (PNLD 2012)

Faremos aqui a análise “bachelardiana” dos livros didáticos. Como estratégia para demonstrar nossa tese, analisaremos sob a ótica do princípio da complementaridade de Bohr, dita a “interpretação ortodoxa da mecânica quântica” e que tem um caráter não realista. Mostraremos que em sua maioria os livros texto se afastam desta interpretação. De fato, o fio condutor para entender a forma como os conceitos de mecânica quântica são apresentados nos livros do PNLD é o realismo. Para tornar nossa tarefa mais objetiva analisaremos a forma como são apresentadas a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza.

Colocamo-nos aqui com a tarefa de psicanalisar o realismo apresentados nos livros. Conforme discutido anteriormente, para Bachelard o realista constrói sua arquitetura de pensamento na defesa da propriedade do objeto, em mecanismos que possam de alguma forma explicitar seu domínio. O conhecimento nesta linha de pensamento se transfigura num bem pessoal, na “riqueza do real”, credenciando ao realismo vantagem sobre outras interpretações da natureza. Quando Bachelard psicanalisa o realista ele atribui ao pensamento deste um mecanismo pelo qual opera, o qual chama de substancialização e a tendência realista em pensar através de substâncias é o que caracteriza o obstáculo substancialista.

Assim,

A psicanálise a ser instituída para terapia do substancialismo deve ser a psicanálise do sentimento de ter. O complexo a ser desfeito é o complexo do pequeno lucro, que, para simplificar, pode ser chamado de complexo de Harpagon. É o complexo do pequeno lucro que chama a atenção para as pequenas coisas que não se devem perder porque, uma vez perdidas, a pessoa não as encontra mais. Assim, um objeto pequeno é guardado com muito cuidado. O vaso frágil é o que vai durar mais. Não perder nada é, de saída, uma prescrição normativa. Essa prescrição torna-se, em seguida, uma descrição: passa do normativo para o positivo. Enfim, o axioma fundamental do realismo não provado – nada se perde, nada se cria – é uma afirmação de avarento (BACHELARD,2011, p. 164).

O realista é dotado de uma avareza característica por possuir as certezas do Ser das coisas, ou seja, isto é e aquilo não é. No caso do objeto quântico a avareza se manifesta quando não admitimos o desconhecimento do objeto antes do final da experiência. O realista ao se deparar com esse desconhecimento prefere se ancorar no que já sabe, no que possui, porque “uma vez perdida a realidade, não a encontra mais”.

4.1 ANÁLISE DOS TEXTOS SOBRE DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Vejamos o extrato do Livro Física Aula por Aula,

[...] é costume usar a expressão dualidade onda-partícula para descrever uma curiosa característica: em determinadas situações (que basicamente dependem das escalas de energia e das dimensões envolvidas), ondas podem se comportar como partículas e, em outras, partículas podem exibir características tipicamente associadas às ondas (por exemplo, fenômenos de interferência e difração) (SILVA & BARRETO, 2010, p. 345).

Nesse extrato referente à dualidade onda-partícula, percebemos a construção de uma superfície, uma casca protetora da essência do objeto. Capaz até mesmo de contradizer seu interior, revelando coexistência de aspectos mutuamente excludentes, uma vez que os comportamentos são apenas a embalagem íntima da matéria. Notem a diferença desta interpretação em relação à natureza comportamental da interpretação de Copenhague, onde não descrevemos a natureza íntima do objeto e sim o fenômeno como um todo.

Essa maneira de expressar a dualidade “atribui a substância qualidades diversas, tanto a qualidade superficial como a qualidade profunda, tanto a qualidade manifesta como a qualidade oculta” (BACHELARD, 2011, p. 121). Para Bachelard esta é a típica estratégia do realista: Recorrer ao exterior para esconder o conteúdo do cofre. Este obstáculo epistemológico, descrito em detalhes no capítulo anterior, o qual Bachelard dá o nome de substancialista, se estabelece na propensão “a intuições valorizadas: todo invólucro parece menos precioso, menos substancial do que a matéria que ele envolve – a casca, cuja função é tão indispensável, é vista como simples proteção da madeira.” (BACHELARD, 2011, p. 123). Determinando o mito mais profundo do íntimo, também chamado de mito do interior, em que “a ideia substancialista quase sempre é ilustrada por uma simples continência (é preciso que a qualidade profunda esteja contida). Ao examinar tais intuições, logo se percebe que, para o espírito pré-científico, a substância tem um interior; ou melhor, a substância é um interior” (BACHELARD, 2011, p. 123).

Veremos a seguir num recorte da coleção Quanta física a evidência da estruturação calcada “do interior para o exterior das substâncias, prevalecendo-se da experiência externa evidente, mas escapando a crítica no mergulho na intimidade (BACHELARD, 2011, p. 121).” Ao utilizar o postulado quântico como qualidade corpuscular superficial, o extrato protege a “riqueza do real” ondulatória do objeto quântico, caracterizando assim a forma avarenta realista de pensar. Vejamos:

A dualidade onda-partícula pode ser sintetizada assim: os objetos quânticos, como a luz ou os elétrons, se movem como se fossem ondas, mas colidem como se fossem partículas.

[...] Ondas de alta frequência, como os raios X, colidem como se fossem partículas; por outro lado, partículas muito pequenas, como elétrons, difratam como ondas (KANTOR ET AL., 2010, p.44).

O obstáculo substancialista aparece enquanto afirmação da realidade, embora características tragam alguma informação objetiva, são deixadas de lado para valer-se da intimidade, do interior. Porque na alegria avarenta do realista, o saber é um bem pessoal que deve ser defendido das mãos calorosas de outros. Nesta perspectiva podemos tratar de um exemplo descrito por Bachelard: “O mercúrio, embora branco por fora... é vermelho por dentro... A cor vermelha... surge quando ele é precipitado e calcinado ao fogo” ((BACHELARD, 2011, p. 126).

De forma semelhante, o livro *Compreendendo a Física* trata a dualidade onda-partícula:

Na verdade, essa afirmação não é correta: a dualidade alternativa, ser uma coisa ou outra, não existe. Para a física atual, não há dúvidas de que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de fótons. A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe, que é ondulatório. É como uma torcida organizada. Ela se compõe de indivíduos perfeitamente identificados como partículas. Mas, durante o jogo, esses indivíduos comportam-se coletivamente de acordo com determinadas regras, seguindo uma espécie de coreografia, como ondas (GASPAR, 2011, p.283).

Os dois extratos são similares, se por um lado a cor aparente não tem relevância, pelo outro, o comportamento é meramente a característica. Temos aqui novamente o mito do interior, porém a substancialização é privilegiada no quadro da partícula. Citando Bachelard:

Para bem caracterizar o fascínio da ideia de substância, será preciso procurar-lhe o princípio até no inconsciente, no qual se formam as preferências indestrutíveis. A ideia de substância é tão clara, tão simples, tão pouco discutida, que deve apoiar-se numa experiência bem mais íntima que qualquer outra ((BACHELARD, 2011, p. 163).

Vejamos outro extrato do mesmo livro:

O caráter corpuscular da natureza da luz nos leva a uma visão estatística difícil de aceitar; em compensação, a compreensão da maioria dos fenômenos físicos torna-se mais simples.

Grandezas físicas como campos eletromagnéticos que se propagam no espaço completamente vazio, sem suporte algum, descritas por linhas de força ou de campo, entes puramente matemáticos, nunca foram facilmente compreensíveis. Sobretudo porque exercem força sobre partículas carregadas em condutores distantes, giram a agulha de bússolas, imprimem figuras em papel fotográfico, transmitem som e imagem a distância e trazem para nós a luz e o calor do Sol.

É certamente mais fácil aceitar que existam partículas portadoras, como os fótons, de existência materialmente comprovada, que se propagam pelo espaço transportando energia e viabilizando essas interações, do que acreditar que elas se efetivem por ação de entes matemáticos e abstratos (GASPAR, 2011, p. 287).

A demonstração do realismo é semelhante ao caso anterior, o autor atribui uma realidade à descrição do objeto analisado por possuir o conhecimento sobre a realidade subjacente, porém aqui aparece outra característica presente no pensamento realista, a valorização de matérias e qualidades, onde claramente percebemos uma valorização da imagem geométrica ao invés da abstração. É o que Bachelard chama de “o mal da ocularidade”.

Como descrito anteriormente, a filosofia realista, operando através da substancialização, vai construir as explicações dos fenômenos deixando entrever o obstáculo ao conhecimento quantitativo. A demarcação do objeto de estudo com impressões subjetivas e “a hostilidade a matemática como mau sinal quando se junta à pretensão de captar diretamente os fenômenos científicos” é o que caracteriza esse obstáculo epistemológico, nas palavras de Bachelard:

É fácil mostrar que a matematização da experiência é impedida, e não ajudada, por imagens usuais. Essas imagens vagas e grosseiras fornecem um esboço sobre o qual a geometria não tem vez. A refração da luz teve, de imediato, sua "imagem material" que entrou por muito tempo o pensamento, impedindo as "exigências matemáticas". Um autor anônimo, em texto de 1768, oferece esta intuição rápida: "Se enfiarmos um prego comprido num pedaço de gesso ou de pedra, quase sempre o prego entorta".

Não é preciso mais do que isso para que um espírito não-científico "compreenda" a experiência científica. Muitas vezes, em minhas aulas no curso elementar de física, constatei que essa "imagem material" fornece uma imediata e desastrosa satisfação às mentes preguiçosas. Mesmo diante da demonstração precisa, a tendência é voltar à primeira imagem (BACHELARD, 2011, p.278).

Analisaremos agora os livros: Física Ciência e Tecnologia e Física . Estes livros têm em comum o fato de não apresentar um realismo tão arraigado como os anteriores. No entanto, não exploram o caráter não realista da interpretação da complementaridade.

Extrato do livro Física Ciência e Tecnologia:

A teoria de Einstein para o EFE nos dá uma forte evidência em favor da idéia dos fótons ou partículas de luz. [...] quando interage com matéria, o faz como se fosse constituída por partículas com energia $E=h.f$.

[...] os fenômenos de difração e interferência só podem ser explicados considerando a luz como onda. [...] “afinal, a luz é onda ou partícula?”

. [...] Então, qual modelo é correto? [...] Devemos aceitar ambos os modelos! A verdadeira natureza da luz, e das demais radiações eletromagnéticas, não deve ser descrita por apenas por um único modelo teórico. O fóton, necessário para explicar o EFE, e a onda, necessária para explicar a difração e a interferência, **complementam-se mutuamente**.

A luz tem uma **natureza dual**, isto é, exibe características ora de onda, ora de partícula.

O enunciado a seguir exprime o **princípio da complementaridade de Bohr**: No nível quântico, ambos os aspectos, o **corpúscular** e o **ondulatório**, são necessários para uma descrição completa do sistema estudado.

[...] De Broglie, lançou uma ideia ousada e inovadora na Física: “Se fótons apresentam características de onda e de partículas [...], se elétrons são partículas, mas também apresentam características ondulatórias, talvez todas as formas de matéria tenham características duais de onda e partícula” (TORRES, FERRARO E SOARES, 2010, p. 265-267).

Embora os autores descrevem o fenômeno da dualidade de forma não tão realista como os livros analisados anteriormente, afirmam existir “A verdadeira natureza da luz”, caindo de certa modo no mito do interior. Os autores citam o princípio da complementaridade, mas não exploram as características não realistas deste.

O mesmo argumento vale para o livro Física:

Após estudar o modelo ondulatório de Maxwell, segundo o qual a luz (e qualquer outra radiação eletromagnética) é uma onda eletromagnética, e o modelo quântico, em que a luz (e qualquer outra radiação eletromagnética) é constituída de partículas denominadas **fótons**, é natural que surja a seguinte pergunta: afinal, a luz é onda ou partícula?

A resposta atual a essa pergunta é a seguinte: dependendo do fenômeno, a luz **se comporta** como onda ou como partícula. Então, não se diz o que a luz **é**, mas como ela **se comporta** em cada fenômeno. [...] os dois modelos são necessários e se complementam: usando um ou outro, nenhum fenômeno deixa de ser explicado. [...] É importante destacar que a luz, assim como as demais radiações eletromagnéticas, nunca exibe os dois comportamentos **ao mesmo tempo**. Esse é o **Princípio da Complementaridade** proposto pelo físico dinamarquês Niels **Bohr** (Gualter, Newton, Helou, 2010, p. 298).

Notem que aqui a ênfase é dada no comportamento da luz e não na sua natureza intrínseca. Entretanto, existe claramente uma diferença entre o objeto -a luz- e o fenômeno, se afastando da interpretação não realista da dualidade onda-partícula. Ainda no mesmo livro temos o extrato:

O físico francês Louis de **Broglie** (1892-1987) propôs, em 1924, que essa dualidade também poderia ser válida para entidades normalmente tratadas como corpos, ou seja, como porções de matéria (elétrons, prótons, partículas α , bolas de bilhar etc). [...] estava propondo que haveria uma **onda** associada, por exemplo, a um elétron. [...] Em 1927, a teoria de De Broglie foi confirmada pela primeira vez, em um experimento no qual se determinou o comprimento de onda do elétrons que sofreram difração. Assim, elétrons, que até então se acreditava ter comportamento exclusivamente corpúscular, revelaram um comportamento ondulatório (dualidade onda-partícula) (Gualter, Newton, Helou, 2010, p. 319).

Onde percebemos o mesmo tipo de substancialismo dos textos anteriores. O que é natural quando se faz referência a de Broglie, que sempre defendeu uma interpretação realista da mecânica quântica.

No livro Física para o Ensino Médio temos o extrato:

Portanto, a luz possui caráter dual; ou seja, ela se comporta como onda ou como partícula, de acordo com o fenômeno analisado. Dessas maneiras, os dois modelos se complementam perfeitamente. [...] De Broglie apresentou, em 1924, a hipótese de que as partículas poderiam exibir propriedades ondulatórias. [...] De fato, qualquer experimento que se realize com a luz ou com a matéria pode evidenciar um e apenas um dos caracteres, que não são contraditórios, mas sim complementares: ora como onda, ora como partícula.

O **princípio da complementaridade** [...], estabelece que em cada fenômeno físico observado, somente um dos comportamentos se manifesta por vez.

Dois fatos importantes devemos ressaltar:

- Em todo fenômeno relativo a radiações eletromagnéticas, que não implique na transformação de energia, será observado o caráter ondulatório da radiação. [...].

- Em todo fenômeno relacionado com radiações eletromagnéticas, cuja energia sofra transformação, a radiação se comportará como partícula. [...].

Sob a ótica da conversão de energia, o princípio da complementaridade ganha sentido: não existe nenhum fenômeno conhecido por nós que permita observar simultaneamente os comportamentos ondulatório e o corpuscular de uma radiação: observa-se sempre o caráter ondulatório ou o caráter corpuscular da radiação (FUKE & YAMAMOTO, 2010, P. 251-253).

Note que diferentemente dos outros livros analisados a ênfase é dada no fenômeno e não na natureza da luz ou da partícula. Não identificamos aqui obstáculos como nos casos anteriores.

Por fim destacamos o livro Física em Contextos, que diferentemente dos demais textos permite que o leitor tenha contato com um discurso não realista acerca dos fenômenos quânticos, como podemos perceber no seguinte extrato:

[...]. O que devemos ter em mente é que precisamos das duas representações para tratar da natureza da luz. Em alguns fenômenos, ela se apresenta como onda, em outros como partícula. É o que chamamos em Física de natureza dual da luz, ou ainda, de **dualidade onda-partícula**. [...] Note que, ao tentar responder à questão sobre a natureza da luz, chegamos a outras questões importantes, como: essas teorias explicam a realidade ou são modelos que em determinadas condições, se adaptam melhor na descrição da realidade? [...] É importante dizer que a dificuldade na representação da luz não é um problema da própria luz, mas dos meios que a Ciência, e em particular a Física, tem em descrever fenômenos e situações. [...] É importante dizer que é o modelo que se adapta à situação, não é a luz que se transforma em partícula ou onda. [...] Bohr propôs o princípio da complementaridade, considerando que a luz se comporta como partícula ou como onda. Nunca como ambas simultaneamente. [...] Nesse sentido, a dualidade onda partícula e a questão sobre a Relatividade do espaço e do tempo servem de alerta aos limites de nosso intelecto em lidar com a complexidade da natureza além do mundo cotidiano (PIETROCOLA ET AL, 2010, p. 384-385).

Neste mesmo livro os autores fazem um discussão da dualidade onda-partícula através do interferômetro Mach-Zehnder destacando quatro interpretações: corpuscular realista, ondulatória realista dualista realista e complementaridade, como podemos ver no extrato abaixo:

Segundo a interpretação ondulatória, um fóton é um “pacote de onda” que talvez em S1, se divida em dois “meios fótons”, que se recombina em S2. No entanto, até hoje, não se detectou um “meio fóton”.

Na interpretação corpuscular, sendo o fóton uma partícula, não há uma boa explicação para o fenômeno observado. Pode-se tentar justificar dizendo que a lógica do mundo quântico é diferente da lógica do mundo macroscópico e o fóton pode ser e não ser uma partícula ao mesmo tempo.

Originalmente formulada por Luis de Broglie e redescoberta por David Bohm, a interpretação dualista realista explica que a luz se divide em duas partes: uma partícula e uma onda; com a posição da partícula dependendo da frequência da onda.

Segundo a interpretação proposta por Niels Bohr, a da complementaridade, a luz pode ser ou onda ou partícula, nunca as duas ao mesmo tempo. Desse modo, o resultado desse experimento indica um fenômeno ondulatório, no qual a luz não segue um caminho bem definido. Assim não faz sentido perguntar onde está o elétron (PIETROCOLA ET AL, 2010, p. 386).

Vimos nesta seção que o conceito bachelardiano de avareza realista está subjacente na interpretação da dualidade onda partícula, onde identificamos claramente o obstáculo substancialista e o obstáculo ao conhecimento quantitativo.

Constatou-se uma linha de raciocínio que permite, por exemplo, que se saiba o que é o objeto quântico antes do final da experiência. Esta é a lógica subjacente em todas as interpretações realistas da mecânica quântica onde fica evidente a necessidade de revelar a natureza íntima da matéria, em detrimento da noção de fenômeno, fundamental na interpretação positivista de Bohr da mecânica quântica.

Vejamos na próxima seção como o realismo aparece no princípio da incerteza.

4.2 ANÁLISE DOS TEXTOS SOBRE O PRINCÍPIO DA INCERTEZA

A visão epistemológica do princípio de incerteza sustenta que o objeto quântico tem posição e momento bem definidos, no entanto, desconhecidos. Já, a visão ontológica sustenta que o objeto quântico nunca possui simultaneamente valores bem definidos para estas duas grandezas. A visão epistemológica desse princípio é consequência da interpretação realista, enquanto a visão ontológica é consequência da interpretação positivista, segundo a qual só tem sentido aquilo que é observado. Como consequência da visão epistemológica temos uma natureza clássica subjacente ao mundo quântico, porém inacessível devido ao distúrbio interacional. Veremos que esta é a visão mais comumente apresentada nos livros didáticos.

Mais uma vez é o desejo de posse do objeto quântico em sua totalidade que age para a construção do conceito, levando a uma visão realista, caracterizada pela versão epistemológica do princípio da incerteza. Mostraremos aqui o aparecimento de outros obstáculos epistemológicos, dando ênfase para o obstáculo do conhecimento quantitativo.

O obstáculo do conhecimento quantitativo fica caracterizado quando notamos que os autores não expressam de maneira clara e discursiva as relações do objeto quântico com o método de medir. Como descrito anteriormente, para Bachelard, o objeto de medida descrito pela ciência é um grau de aproximação do método de medida, um coeficiente das relações do objeto (ver citação na página 24).

Passemos a análise dos livros.

No livro *Física Aula por Aula* destacamos:

É possível provar que existem algumas quantidades na Mecânica Quântica que desfrutam de uma condição curiosa: É impossível que se obtenha medidas simultâneas de duas delas com grau de precisão arbitrário. Isso ocorre, por exemplo, com as medidas do momento (quantidade de movimento) e da posição das partículas. Quanto mais se melhora a precisão na determinação da posição de uma partícula, pior se conhece a velocidade (que está relacionada à quantidade de movimento) que ela tem. [...] Agora observe uma coisa curiosa: quando essa radiação (fótons) atinge um elétron, a colisão fornece energia a ele, alterando sua velocidade, fato parecido com o que ocorre no choque entre duas bolinhas de bilhar (ao se chocar, uma empurra a outra). Dessa forma, a iluminação do elétron com objetivo de medir sua posição gera uma mudança no seu movimento, acarretando uma incerteza na medida (SILVA & BARRETO, 2010, p. 348).

O texto sugere a seguinte interpretação: A posição e o momento da partícula existem ao mesmo tempo, como nos observáveis macroscópicos, porém não podem ser medidos ao mesmo tempo. Isso caracteriza o princípio da incerteza epistemológico, característico do pensamento realista.

Fica delineado aqui o obstáculo do conhecimento quantitativo, pois se percebe que não há uma relação entre o objeto quântico e o método de medição e, em todos os níveis da experimentação, não se deve nunca separar o resultado do aparelho que o permite ou do método que o autoriza, determinando constantemente o que de fato pode ser negligenciado. Trata-se da solidarização do objeto da medida com a própria medida. Lembramos também que na Interpretação da Complementaridade da Mecânica Quântica o conceito de medida é um conceito primitivo da teoria e não pode ser reduzido à mesma, como fica claro no exemplo dado pelos autores. De uma forma geral, quando reduzimos a medida à teoria, levamos a nossa Intuição da ordem de grandeza costumeira ao universo microscópico.

Bachelard (2011, p. 275) argumenta: “as vezes, bastam uma imagem, uma palavra. Em poucas linhas, por simples referência a uma experiência costumeira, explica-se o Mundo; passa-se sem cerimônia do pequeno para o grande.”

Veremos agora outro extrato do livro Física para o Ensino Médio:

Outra Observação muito importante é que o conceito de medida sofreu alteração drástica na física quântica. Não se pode medir uma partícula sem interferir com ela. De fato, existem valores determinados para a posição e velocidade, mas o fato de não podermos obtê-las isoladamente com precisão tão grande quanto queiramos é uma decorrência do fato de que elas não são independentes uma da outra (YAMAMOTO & FUKU, 2010, p. 256).

Notamos aqui que os autores começam afirmando que o conceito de medida muda na física quântica, no entanto terminam afirmando que a posição e a velocidade da partícula existem, mas não podem ser medidas ao mesmo tempo, caracterizando mais uma vez o princípio da incerteza epistemológico, conseqüentemente o realismo.

O obstáculo do conhecimento quantitativo fica mais uma vez caracterizado pela ausência de relação entre o método de medida e o objeto de medida. Este é reforçado aqui quando usamos imagens comuns para tratar conceitos que estão em escalas fenomenológicas distintas.

Do livro Quanta Física destacamos o seguinte extrato:

Nos tubos de imagens das TVs, são elétrons impulsionados por milhares de volts que atingindo a tela em determinados pontos, compõem as imagens. Imagine que se quisesse observar esse trajeto de um dos elétrons: não seria possível! Vamos ver porque: teríamos de iluminá-lo, atingindo-o com fótons de luz e isso o desviaria do percurso original ou lhe causaria um espalhamento ou deflexão, de maneira que esse elétron não chegaria ao ponto previsto da tela. Efeito semelhante aconteceria se, no trajeto do elétron, colocássemos uma fenda, por onde tivesse de passar, como técnica para termos certeza de qual seria esse trajeto. Quanto mais fina a fenda, mais precisamente saberíamos por onde o elétron passou, mas perderíamos a ideia de sua direção, pois, nesse caso, também, ele se desviaria por difração. A mesma dificuldade

em saber “por onde passou o elétron que atingiu um ponto da tela” teríamos se quiséssemos saber “por onde passou o fóton que marcou um ponto negro em uma fotografia”. A luz caminha como uma onda, sem trajetória identificável, mas quando atinge uma molécula do composto de prata impressionando o filme, tudo se passa como se a luz fosse partícula bem localizada. Elétrons, luz e todos os demais objetos do “mundo quântico” não podem ser observados da mesma forma que os objetos do “mundo macroscópico”. Essa limitação de observação foi expressa pelo físico alemão (1901-1976), em 1927, na forma do *princípio da incerteza*: quanto mais precisamente for o conhecimento de “por onde passa um objeto” (Δx), menos preciso é o conhecimento de “em que direção ele vai” (isto é, da quantidade de movimento vetorial, Δp). O valor absoluto do produto das incertezas: *por onde passa? Δx por em que direção vai? Δp* é sempre maior ou igual à constante h , de Planck, dividida por 4π : $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ (KANTOR ET ALL., 2010, p.47).

Mais uma vez, o princípio de incerteza é descrito na sua forma epistemológica, sustentando que o objeto quântico tem posição e momento bem definidos, no entanto, desconhecidos. Os autores ponderam sobre a limitação dos resultados experimentais, descrevendo a dificuldade de obtenção de informações precisas das grandezas clássicas devido ao distúrbio interacional, sustentam que os resultados, embora imprecisos, são fiéis às características do objeto quântico, ou seja, as grandezas medidas são afirmações da sua realidade. No entanto, os autores não fazem a necessária análise discursiva do método de medida, como propõe Bachelard na caracterização do obstáculo epistemológico do conhecimento quantitativo:

O objeto medido nada mais é que um grau particular da aproximação do método de mensuração. [...] O objeto pode, então, mudar de natureza quando se muda o grau de aproximação. Pretender esgotar de uma só vez a determinação quantitativa é deixar escapar as relações do objeto. Quanto mais numerosas forem as relações do objeto com outros objetos, mais instrutivo será seu estudo. [...] A objetividade é afirmada aquém da medida, enquanto método discursivo, e não além da medida, enquanto intuição direta de um objeto. É preciso refletir para medir, em vez de medir para refletir. Quem quiser fazer a metafísica dos métodos de mensuração deve dirigir-se ao criticismo, e não ao realismo (BACHELARD, 2011, p. 261, 262).

Do livro *Compreendendo a Física* de Alberto Gaspar destacamos o recorte que se encontra na página 358 e 359:

A incapacidade de conhecermos a medida exata do diâmetro de uma arruela não significava que essa medida não existisse. Talvez nunca fosse possível chegar à medida exata, mas havia a certeza de que essa medida existia. Para o inconformismo de inúmeros físicos, a física moderna acabou também com essa “certeza”. Na verdade, o que a física moderna afirma é que a incerteza é inevitável. Não se trata de limitação de instrumento de medida, do processo ou do experimentador. Mesmo que todos – instrumento, processo e experimentador – sejam perfeitos, a incerteza sempre existe, pois resulta do próprio ato de medir. Para entender melhor esta estranha afirmação, veja a situação proposta a seguir: Como você poderia saber com as mãos a forma de uma estatueta de areia escondida dentro de uma caixa? (GASPAR, 2011, p. 358-359).

Retrata o princípio da incerteza como resultado do próprio ato de medir, e pondera que não faz sentido falar em “posição” do elétron, expressando os limites das medidas. Utiliza de analogias como: o efeito de um fóton interagindo com um elétron é tão grande como o de uma bola de bilhar chocando-se com outra, para justificar a incerteza do próprio ato de medir. Apresenta o princípio da incerteza de forma epistemológica, admitindo que existam grandezas clássicas no mundo quântico. No entanto, com a afirmação “a física moderna acabou também com essa certeza”, o autor desloca-se do pensamento realista para o pensamento positivista, se aproximando da forma ontológica na descrição do princípio de incerteza, ainda que de forma qualitativa. Podemos perceber, também, este deslocamento para a forma ontológica do princípio da incerteza quando o autor afirma que a incerteza é inevitável e que resulta do próprio ato de medir.

No livro FÍSICA Ciência e Tecnologia destacamos o seguinte recorte:

Na Física Clássica [...], podemos fazer medições com um grau pequeno de imprecisão, quase sem erro.

Na Física Quântica, a realidade é bem diferente [...]. No mundo das partículas subatômicas “os valores de certos pares de grandezas físicas, denominadas variáveis **conjugadas, não podem ser conhecidos**, simultaneamente, com precisão ilimitada.

O princípio da incerteza de Heisenberg inicia uma nova interpretação do universo na escala subatômica, a interpretação probabilística da Física Quântica, também conhecida como **Interpretação de Copenhagen**, dada a forte colaboração de Niels Bohr, originado o conceito de função de onda da partícula, introduzido por Max Born, que descreve probabilisticamente toda a evolução do processo no qual a partícula está inserida (TORRES, FERRARO E SOARES, 2010, p. 270-271).

O texto sugere que apesar das variáveis conjugadas não poderem ser conhecidas simultaneamente com precisão ilimitada, elas existem. Desta forma fica caracterizado a visão epistemológica do princípio da incerteza, resultado de um pensar realista.

Por fim, ressaltamos que o realismo que aparece nas descrições do princípio da incerteza apresentadas aqui está balizada no racionalismo Newtoniano. Atribuímos ao racionalismo Newtoniano a alcunha de conhecimento objetivo imediato. Ao fazer isto, alertamos para outro obstáculo epistemológico que em nossas análises parece anteceder à estrutura de pensar do obstáculo ao conhecimento quantitativo, isto é, anterior à estrutura cognitiva que impede a matematização do discurso qualitativo. Queremos nos referir ao Conhecimento Geral como contra pensamento. Frente ao fenômeno quântico a racionalização Newtoniana pautada na dicotomia realista da natureza como onda-partícula seria o que Bachelard caracteriza como a “falsa doutrina do geral”, em suas palavras:

Nada prejudicou tanto o progresso do conhecimento científico quanto a falsa doutrina do geral, que dominou de Aristóteles a Bacon, inclusive, e que continua sendo, para muitos, uma doutrina fundamental do saber. [...] Há de fato um perigoso prazer intelectual na generalização apressada e fácil. A psicanálise do conhecimento objetivo deve examinar com cuidado todas as seduções da facilidade. Só com essa condição pode-se chegar a uma teoria da abstração científica verdadeiramente sadia e dinâmica (BACHELARD, 2011, p. 65).

Os demais livros não apresentam o princípio da incerteza. Os livros *Conexões com a Física e Física e Realidade* não contemplam a dualidade onda-partícula, nem o princípio da incerteza.

5 PRODUÇÃO EDUCACIONAL

A proposta deste trabalho é a elaboração e formatação de uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula utilizando a experiência da fenda dupla e o interferômetro de Mach-Zehnder e sobre a interação radiação eletromagnética e a matéria através do efeito fotoelétrico. A elaboração desta sequência didática foi subsidiada pela determinação prévia dos obstáculos epistemológicos presentes nos livros didáticos de física avaliados pelo MEC.

Foram elaborados textos de apoio para facilitar o acompanhamento por parte dos alunos e também para orientar os professores que vierem a reaplicar esta sequência.

Esta sequência didática foi aplicada, durante o primeiro semestre do ano 2015, em uma turma do terceiro ano do ensino médio da Escola Estadual de Educação Básica Professor Justino Costa Quintana. Trata-se de uma turma de aproximadamente 20 alunos do turno da noite.

É importante salientar que a nossa escola está, atualmente, com o prédio interditado e que essa interdição já se estende por dois anos. A nossa escola, portanto, está atuando em prédios “emprestados”, o que por si só provoca constrangimentos a toda comunidade escolar, pois a falta de identidade é um sentimento comum a todos. A operacionalidade também fica dificultada, pois não temos a disposição nossa biblioteca e a nossa sala de informática. Assim, as atividades com o Interferômetro virtual ficou impossibilitada, no entanto, a atividade foi feita de modo demonstrativo com a utilização do data show e foi possibilitado o link para os alunos que quisessem aprofundar seus conhecimentos sobre este interferômetro bem como um roteiro para explorar o mesmo.

Por outro lado, nosso trabalho foi facilitado pelo fato do professor pesquisador ter sido professor desses alunos nas duas séries subsequentes (1º e 2º anos do EM) e, no presente ano, professor de “seminários integrados” dessa turma do 3º ano do EM, o que nos permitiu uma maior mobilidade e flexibilidade na aplicação das propostas pedagógicas.

Utilizamos na aplicação da sequência didática proposta os seguintes materiais pedagógicos: textos de apoio, quadro negro, data show e notebook para a apresentação de slides, bem como, para a projeção de filmes pedagógicos relacionados com os assuntos das respectivas aulas.

Essa sequência foi aplicada no decorrer de 21 horas aulas, através de aulas expositivas dialogadas intercaladas por experimentos mentais e concretos demonstrativos.

Cada uma das atividades que constam no quadro abaixo foi realizada em 3 horas aula de aproximadamente 45 minutos cada, duas aulas numa sexta feira e uma aula na segunda feira.

A estratégia adotada foi de desenvolver o conteúdo nas duas aulas de sexta feira e na aula da segunda feira retomar, de forma breve, o conteúdo desenvolvido promovendo a discussão dos pontos polêmicos.

Antes do desenvolvimento das atividades que constam no quadro abaixo foi realizada uma breve revisão, em três horas aula, sobre os teoremas de conservação, ondas e eletromagnetismo

As atividades desta sequência estão destacadas no quadro abaixo:

QUADRO 1 – Relação entre recursos e objetivos de ensino e de aprendizagem.

Recurso	Objetivo de Ensino	Objetivo de Aprendizagem
<p>1) Realismo e Antirrealismo na Física Quântica. Realismo Científico. Texto de apoio.</p>	<p>Aprofundamento à compreensão da realidade física polarizado por duas posições filosóficas opostas. Origens do conhecimento. Limites do conhecimento. Realidade.</p>	<p>O aluno deverá ser capaz de exercer uma reflexão crítica acerca da “Realidade”, além da realidade cotidiana e imediata e corresponder as representações sobre a realidade e a própria realidade. O aluno deverá concluir que: - o avanço do conhecimento científico faz com que, cada vez mais, ele se diferencie do real observado; - as representações da realidade criadas pela ciência são cada vez mais abstratas. Transformar a imagem da realidade. Caracterizar e diferenciar Realismo e Antirrealismo.</p>
<p>2) Interação radiação eletromagnética e matéria através do efeito fotoelétrico. Texto de apoio.</p>	<p>Grandezas discretas e grandezas contínuas. Efeito fotoelétrico. Experimento de Philipp Lenard. Contradições da Física Clássica. Quantização da energia. Constante de Planck. Interação partícula-partícula. Interação onda-partícula. Postulado quântico.</p>	<p>Definir efeito fotoelétrico. Concluir que a ejeção de elétrons não depende da Intensidade da radiação incidente, contrariando o eletromagnetismo clássico. Concluir que a ejeção de elétrons depende da frequência da radiação incidente. Conceituar frequência de corte (f_0) e potencial de corte (V_0). Relacionar a energia cinética dos elétrons ejetados com f_0. Relacionar V_0 com as frequências. Concluir que nesse experimento o fenômeno é corpuscular e que a radiação é constituída de pequenos pacotes de energias (fótons). Relacionar a energia de cada fóton com sua frequência e com a constante de Planck. Concluir que os fenômenos envolvendo a radiação eletromagnética, dependendo arranjo experimental, pode ser ondulatório ou corpuscular. Extrapolar esse comportamento dual às partículas materiais. Concluir que a ordem de grandeza da constante de Planck não pertence a escala</p>

		<p>de ordem de grandeza humana e que a mesma pode ser encarada como limite de aplicação da física clássica.</p> <p>Enunciar o postulado quântico.</p> <p>Identificar a ruptura entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.</p>
<p>3) Experimento metal da fenda dupla com “esferas” (corpúsculos), atividade experimental concreta com a “tábua de Galton” construídas pelos alunos.</p> <p>Experimento mental ou concreto (demonstrativo) fenda dupla com ondas circulares na cuba de ondas.</p> <p>Texto de apoio.</p>	<p>Corpúsculos</p> <p>Probabilidade</p> <p>Sobreposição</p> <p>Ondas</p> <p>Interferência de ondas</p> <p>Interferência construtiva</p> <p>Interferência destrutiva</p> <p>Padrão de interferência</p> <p>Probabilidade</p>	<p>Fenda dupla com esferas:</p> <p>Identificar a curva P_1.</p> <p>Identificar a curva P_2.</p> <p>Identificar a curva P_{12}.</p> <p>Concluir que $P_{12} = P_1 + P_2$.</p> <p>Concluir que as esferas não interferem.</p> <p>Tábua de Galton:</p> <p>Reconhecer que a quantidade de esferas em cada coluna da Tábua de Galton representa a probabilidade de uma determinada esfera ocupar tal posição.</p> <p>Que o fenômeno em questão envolve, inclusive, o aparato experimental.</p> <p>Cuba de ondas:</p> <p>Identificar a curva P_1.</p> <p>Identificar a curva P_2.</p> <p>Identificar a curva P_{12}.</p> <p>Concluir que $P_{12} \neq P_1 + P_2$.</p> <p>Reconhecer os pontos onde a interferência é construtiva e os pontos onde é destrutiva.</p> <p>Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas das atividades com esferas e com ondas circulares na cuba.</p> <p>Relacionar padrão de interferência e probabilidade.</p> <p>Reconhecer que a interferência é uma característica ondulatória (padrão de interferência).</p>
<p>4) Experimento concreto (demonstrativo) e experimento mental da fenda dupla com a luz.</p> <p>Experimento mental fenda dupla com elétrons (não localizado).</p> <p>Experimento mental fenda dupla com elétrons e com a</p>	<p>Interferência da luz</p> <p>Fenômenos ondulatório com da luz.</p> <p>Padrão de interferência da luz.</p> <p>Interferência de elétrons</p> <p>Fenômeno corpuscular com elétrons.</p> <p>Destacar como uma das</p>	<p>Fenda dupla com a luz:</p> <p>Reconhecer que a formação das bandas claras refere-se à interferência construtiva.</p> <p>Reconhecer que a formação das bandas escuras refere-se à interferência destrutiva.</p> <p>Concluir, que neste experimento com a luz, o fenômeno é ondulatório.</p> <p>Fenda dupla com elétrons (não localizados)</p>

<p>determinação da fenda pela qual os elétrons passam (localizado). Interpretação da versão fraca da dualidade onda-partícula. Texto de apoio.</p>	<p>características da mecânica Quântica o fato que ela pode ser interpretada de diferentes maneiras internamente consistentes e consistentes com experimentos quânticos.</p>	<p>Identificar a curva P_1. Identificar a curva P_2. Identificar a curva P_{12}. Concluir que $P_{12} \neq P_1 + P_2$. Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas das atividades 3 e 4. Identificar o padrão de interferência Concluir que os estados (aberto ou fechado) das fendas condicionam a distribuição espacial dos elétrons na tela detectora. Concluir que os elétrons interferem, característica de onda. Concluir que nesta experiência os elétrons são localizados durante a detecção, característica de corpúsculo. Concluir que o fenômeno não é puramente ondulatório. Concluir que o fenômeno não é puramente corpuscular. Abstrair que o elétron não é onda e nem corpúsculo e que isto é uma contradição lógica. Fenda dupla com elétrons (localizados)</p> <p>Identificar a curva P_1. Identificar a curva P_2. Identificar a curva P_{12}. Concluir que $P_{12} = P_1 + P_2$. Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas das atividades 1, 2, 4 e 5. Identificar as semelhanças entre o experimento com elétrons e o experimento com esferas. A localização da fenda pelo qual passa cada elétron faz com que o padrão de interferência não seja mais observado. Inferir que não é possível simultaneamente observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada elétron. Extrapolar os resultados desta experiência para todas as partículas quer sejam de luz (fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...).</p> <p>O aluno deverá ser capaz caracterizar as quatro interpretações básicas, evidenciando seus problemas e suas divergências, da versão fraca da dualidade onda-partícula (o experimento da fenda dupla), priorizando a interpretação da Complementaridade:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interpretação Ondulatória; - Interpretação Corpuscular; - Interpretação Dualista Realista;
--	--	---

		- Interpretação da Complementaridade.
<p>5) Interferômetro de Mach-Zehnder: Em regime Clássico. Em regime Quântico com trajetória indefinida. Em regime Quântico com trajetória definida.</p> <p>Interpretação da versão forte da dualidade onda-partícula. Interpretações da Mecânica Quântica: ondulatória, corpuscular, dualista realista e complementaridade. Experimento da escolha demorada. Texto de apoio.</p>	<p>Interferência da luz Comportamento ondulatório da luz. Padrão de interferência da luz. Comportamento corpuscular da luz. Interpretações da Mecânica Quântica.</p>	<p>Em regime Clássico: Reconhecer que os feixes A e B que chegam do detector D1 não têm diferença de fase entre si (interferência construtiva) - 100% do feixe original. Reconhecer que os feixes A e B que chegam do detector D2 têm diferença de fase de $\lambda/2$ entre si (interferência destrutiva) - 0% do feixe original. Concluir que esse experimento com a luz é um fenômeno ondulatório.</p> <p>Em regime Quântico- trajetória indefinida: Concluir que o IMZ Quântico tem o mesmo comportamento do IMZ Clássico, interferência construtiva em D1 e, destrutiva em D2. Concluir que nesse experimento o fenômeno é ondulatório.</p> <p>Em regime Quântico - trajetória definida: Reconhecer que nessa situação o padrão de interferência desaparece. Concluir que o fenômeno apresenta trajetória definida, portanto é corpuscular.</p> <p>Interpretações: Distinguir as diferenças filosóficas das interpretações. Reconhecer a interpretação da complementaridade como a mais aceita pela comunidade científica. Ser capaz de enunciar a versão forte.</p>
6) Avaliação dos resultados das atividades anteriores	A interação dos objetos atômicos e dos instrumentos de medida é parte integrante dos fenômenos quânticos.	<p>Após as atividades propostas e a avaliação dos resultados o aluno deverá ser capaz de concluir:</p> <ul style="list-style-type: none"> - que as propriedades atribuídas a uma partícula dependem das características do dispositivo experimental; - que toda medida perturba o sistema medido; - que toda medida deve-se a uma interação entre o objeto microscópico sobre o qual se efetua a medida e o instrumento de me-

		<p>dida, que é macroscópico;</p> <ul style="list-style-type: none">- que existe uma ligação indestrutível, não nula, entre o objeto e o aparelho de medida;- que as propriedades de uma partícula não podem ser separadas das condições de sua manifestação;- que um aparelho de medida pode tornar evidente uma grandeza específica, mas não outra;- que o arranjo experimental determina o tipo de fenômenos observados;- que nenhuma experiência revela um fenômeno ondulatório e corpuscular simultaneamente.- que nesta experiência só podemos calcular a probabilidade de que determinada partícula se manifeste num determinado ponto da tela detectora;
--	--	--

6 METODOLOGIA DE PESQUISA

Destacamos que os dados que serão utilizados neste trabalho serão obtidos previamente, durante e após a aplicação da sequência didática, objeto da presente pesquisa. Destacamos, também, que este instrumento será aplicado na própria escola, numa turma do terceiro ano do nível médio com aproximadamente vinte alunos. Destacamos, ainda, que os dados colhidos previamente e durante a aplicação da sequência didática serão utilizados como subsídio para qualquer alteração (correção), inclusão ou até mesmo para a exclusão de conteúdos e/ou estratégias da respectiva sequência com o objetivo de aprimorá-la, bem como aprimorar a prática do professor. Desta forma nossa pesquisa qualitativa pode ser caracterizada como uma pesquisa-ação, visto que estaremos utilizando estes dados para dirigir a ação tanto do professor pesquisador como a ação dos alunos envolvidos na pesquisa e como estaremos colhendo os dados diretamente na sala de aula, no ambiente natural onde estarão ocorrendo o ensino e a aprendizagem, nossa pesquisa pode ser caracterizada, também, como uma pesquisa de campo.

Os dados colhidos previamente, sobre os obstáculos epistemológicos presentes nos livros texto de física serão fornecidos pela pesquisa específica, já em curso, de um grupo de pesquisa orientado pelo Professor Doutor Daniel Nedel na Universidade do Pampa (Unipampa), Campus Bagé/RS.

Durante a aplicação da sequência didática os dados serão obtidos através de observações, anotações e pela aplicação de um teste.

Após uma análise quantitativa descritiva dos dados obtidos poderemos validar ou não a nossa sequência didática, bem como efetivar possíveis correções.

7 ANÁLISE DOS DADOS

Neste capítulo analisaremos os dados obtidos pela aplicação de um teste de escolha simples, que se encontra no apêndice D e através das observações feitas em sala de aula durante a aplicação da proposta.

Salientamos que, devido a evasão escolar, o número de alunos diminuiu de modo significativo. Iniciamos a nossa proposta com 20 alunos e a concluímos com um total de 15 alunos.

ANÁLISE DO RESULTADO DO TESTE DE ESCOLHA SIMPLES

- Questão 1:

Quando uma teoria não consegue explicar um determinado fenômeno observado, o que devemos fazer?

- a) Abandonar a teoria. (0%)
- b) Tentar ajustar a teoria. (26,7%)
- c) Utilizar outra teoria e abandonar a anterior. (13,3%)
- d) Utilizar outra teoria e não abandonar, necessariamente, a anterior. (60,0%)

Esta questão procura colocar em discussão a postura de uma pessoa (aluno ou cientista) diante de uma possível ruptura científica. Destacamos que a ideia de ruptura científica foi motivo de discussão polêmica em sala de aula, gerando debates bastantes produtivos. Entendemos que a ruptura entre a Física Clássica e a Mecânica Quântica ficou bem caracterizada nas atividades, bem como o entendimento que o surgimento de uma nova teoria não torna, necessariamente, a antiga teoria obsoleta. De uma total de 15 alunos, 9 marcaram alternativa d (60%) o que evidencia no nosso entender, que os debates sobre este tema foram efetivos e produtivos.

- Questão 2:

Considerando a metáfora da árvore discutida em sala de aula, qual a sua opinião?

- a) Realista, emite o mesmo som que sempre emitiu, haja alguém para ouvir ou não. (40,0%)

- b) Antirrealista, somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência. (26,6%)
- c) Instrumentalista, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante é se o modelo utilizado para descrever sua queda funciona ou não. (13,3%)
- d) Empirista, a pergunta não faz sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento. (20,0%)

Aqui, procuramos destacar a posição filosófica do aluno diante do conhecimento científico e também diante do seu cotidiano, como Realista ou com Antirrealista. Destacamos que nesta discussão em sala de aula foi utilizado um texto de apoio elaborado pela nossa proposta com este fim. A metáfora da árvore foi apresentada e discutida em sala de aula, gerando um certa “alvorço” da turma. Na época a turma se mostrou bastante dividida nas suas opiniões. As respostas a esta questão evidenciam, ainda, esta divisão. A maioria se mostrou Realista (40,0%).

Ainda sobre a questão, O que é Real, tivemos dois momentos lúdicos, com os filmes: Matrix e O Show de Truman.

De acordo com os resultados do teste: 40,0% se dizem Realistas; 26,7% se dizem Antirrealistas; 13,3% se dizem Instrumentalistas e 20% se dizem Empiristas.

- Questão 3:

Um dos assuntos trabalhado em sala de aula foi a interação da radiação eletromagnética com a matéria através do efeito fotoelétrico, onde vimos que a luz quando incide sobre determinado material, poderá arrancar elétrons deste material. Vimos que a Física Clássica não era capaz de explicar a totalidade do fenômeno. A teoria que é capaz de explicar este efeito:

- a) Considera esse fenômeno ondulatório. (13,3%)
- b) Considera esse fenômeno corpuscular. (66,7%)
- c) Considera esse fenômeno ondulatório e corpuscular. (20,0%)

Nesta questão, embora implicitamente, envolve a ruptura destacada anteriormente, bem como a nova teoria que responde a questão da interação radiação- matéria. Este tema foi discutido em sala de aula através do efeito fotoelétrico, com o auxílio de um texto de apoio. Consideramos que o objetivo foi alcançado, pois 66,7% dos alunos responderam que a teoria capaz de explicar o fenômeno considera o efeito fotoelétrico como um fenômeno corpuscular.

- Questão 4:

Para explicar o efeito fotoelétrico é necessário considerar a interação da luz com a matéria, como uma interação do tipo:

- a) Partícula-partícula. (53,4%)
- b) Onda-onda (13,3%)
- c) Partícula-onda (13,3%)
- d) Onda-partícula (20,0%)

Esta questão, implicitamente, remete à questão discutida em sala de aula sobre a interação radiação-matéria ocorrer instantaneamente, portanto, do tipo partícula-partícula. Foi discutido em sala de aula e devidamente exemplificado, tanto as interações instantâneas (partícula-partícula), bem como aquelas que requerem um certo tempo para se efetivarem (onda-partícula). Mais da metade da turma identificaram o efeito foto elétrico, devido ao fato de serem instantânea, com a interação partícula-partícula.

- Questão 5:

A constante de Planck determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada. A ordem de grandeza dessa constante:

- a) Faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico. (13,3%)
- b) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos porque é um número muito grande. (20,0%)
- c) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico porque é um número muito pequeno. (66,7%)

Na nossa proposta didática a constante de Planck aparece pela primeira vez no estudo da interação da radiação eletromagnética com a matéria e que tal constante se apresenta como limite de aplicação da Mecânica Clássica. Nesta oportunidade destacamos a ordem de grandeza desta constante e discutimos a ordem de grandeza da escala humana. A maioria da turma, 66,7%, aproveitaram bem as discussões.

- Questão 6:

Quando um fenômeno (objeto+arranjo experimental) registra uma padrão de interferência, podemos afirmar:

- a) O fenômeno é corpuscular. (6,7%)
- b) O fenômeno é ondulatório. (66,6%)
- c) O fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular. (20,0%)
- d) O fenômeno não é ondulatório e nem corpuscular. (6,7%)

Com esta questão começamos a avaliar a dualidade onda partícula. As atividades pedagógicas deste tema teve a contribuição de um texto de apoio. O resultado desta questão chama a atenção para o fato de que em Mecânica Quântica o fenômeno deve ser considerado na sua completeza e que um fenômeno ondulatório podem ser caracterizado pelo padrão de interferência que aparece na sua detecção. A maioria dos alunos (66,6%) compreenderam os exposições feitas em sala de aula.

- Questão 7:

No experimento da fenda dupla com esferas não houve o registro do padrão de interferência. No experimento da fenda dupla com ondas produzidas na superfície na água numa cuba, bem como, no experimento com elétrons, houve o registro do padrão de interferência. No entanto, quando era localizada a fenda pela qual o elétron passava através de uma iluminação adequada, o padrão de interferência não era mais registrado. Sobre o experimento da fenda dupla com elétrons, podemos afirmar:

- a) Trata-se de um fenômeno exclusivamente corpuscular, pois o elétron é uma partícula. (13,3%)
- b) Trata-se de um fenômeno exclusivamente ondulatório, pois o elétron é uma onda. (0%)
- c) Trata-se de um fenômeno ondulatório e o fato de iluminar o elétron não altera sua natureza. (0%)
- d) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular pois a natureza do elétron foi alterada. (40%)
- e) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular pois a natureza do experimento foi alterada. (46,7%)

Verificamos que após a discussão da difração de elétrons 86,7% dos alunos entenderam que o fenômeno pode ser entendido como ondulatório ou como corpuscular, dependendo

se está ou não identificada a fenda pela qual os elétrons passam, através de uma iluminação adequada.

No entanto, o fato dos elétrons estarem sendo “iluminados” adequadamente, altera a natureza do elétron ou a natureza do experimento, ficou dividida: 40% concluíram que a natureza do elétron foi alterada pela iluminação e 46,6% concluíram que a natureza do experimento é que foi alterada.

- Questão 8

No experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, tanto no regime clássico como no regime quântico, um dos detectores registrou uma contagem de 100% enquanto o outro, registrou 0%. Isto só pode ser explicado pelo fenômeno da interferência. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório. (46,7%)
- b) Corpuscular. (13,3%)
- c) Ondulatório e corpuscular. (20,0%)
- d) Ondulatório ou corpuscular. (20,0%)

Esta e a próxima questão envolvem a dualidade estudada através do Interferômetro Mach-Zehnder, com texto de apoio. Nesta questão buscamos destacar que este padrão, 100% num dos detectores e 0% no outro, é equivalente ao padrão de interferência, caracterizando, então, o fenômeno como ondulatório. Podemos qualificar o resultado como razoável se comparado com os resultados obtidos com as questões da fenda dupla.

- Questão 9:

Num experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, no regime quântico, o caminho pelo qual o fóton percorre foi determinado. Cada um dos detectores registrou uma contagem de 50%. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório. (13,3%)
- b) Corpuscular. (46,7%)
- c) Ondulatório e corpuscular. (20,0%)
- d) Ondulatório ou corpuscular. (20,0%)

Os resultados desta questão corroboram os resultados da questão anterior e nossa análise é semelhante à análise da questão anterior.

Nesta questão em particular estamos destacando o fato da trajetória seguida pelos fótons no interior do interferômetro estar determinada nos levando concluir que tal fenômeno é corpuscular.

- Questão 10:

De acordo com o postulado quântico, a interação entre a matéria e a radiação eletromagnética se dá pela troca de energia de maneira _____, com a matéria absorvendo _____, cuja energia é proporcional a _____ da radiação.

Assinale a alternativa correta que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) Contínua – quanta – amplitude. (20,0%)
- b) Discreta – prótons – frequência. (6,7%)
- c) Discreta – fótons – frequência. (46,7%)
- d) Contínua – elétrons – intensidade. (13,3%)
- e) Contínua – nêutrons – amplitude. (13,3%)

Por fim, com esta questão, buscamos avaliar o entendimento do aluno sobre o postulado quântico. A maioria dos alunos, 53,4%, entende que a absorção de energia se dá de forma discreta, mas destes, 6,7%, mostraram certa confusão entre fóton e próton, o que não faz muito sentido. Talvez isto seja resultado de certa desatenção na hora de assinalar a resposta. Destaco que este percentual de 6,7% corresponde um aluno.

8 CONCLUSÃO

A nossa proposta de sequência didática versando sobre a dualidade onda partícula, como uma atividade para efetivamente inserir a Mecânica Quântica no Ensino Médio, já anteriormente justificada, nos permitiu concluir, durante o processo de sua elaboração, pela análise dos textos sobre a dualidade onda-partícula e sobre o princípio da incerteza presentes nos livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático – 2012, com validade de três anos (2012, 2013 e 2014), uma tendência Realista na descrição dos referidos textos, bem como identificar alguns obstáculos epistemológicos, realista, substancialista e do conhecimento quantitativo, que podem tornar-se obstáculos pedagógicos.

É importante destacar, que os livros do PNLD-2015, quando comparados com a versão PNLD-2012, apresentam, uma certa tendência apontando para uma descrição Não Realista. Este fato nos leva a pensar numa intervenção futura no sentido de continuarmos analisando os livros didáticos para confirmar ou não esta tendência.

A sequência didática, como foi proposta, permitiu uma fértil discussão das filosofias no desenvolvimento científico, principalmente o debate entre o Realismo e Antirrealismo, que de uma certa maneira favoreceu o entendimento das várias Interpretações da Mecânica Quântica, destacando a Interpretação da Complementaridade.

Após a aplicação da proposta, pelos resultados do teste avaliativo, podemos concluir, que a maioria dos alunos apresentam uma visão realista. Fato este não nos é estranho, pois esta é a visão predominantemente no senso comum. Mas, apesar, disto, eles reconhecem que existe outras filosofias igualmente importantes.

Destacamos, também, que a ruptura científica, devido a necessidade de explicar determinados fenômenos que a física clássica não dava conta e da necessidade da descrição microscópica da realidade, ocorre com a formulação de uma nova teoria: a Mecânica Quântica. Concluímos que nossos alunos ficaram cientes desta ruptura após a aplicação da nossa proposta. Em particular, chamou nossa atenção, a unanimidade das resposta do teste em não se abandonar a teoria superada na ruptura.

A ordem de grandeza envolvida na Mecânica Quântica, também ficou clara aos alunos com o conhecimento da constante de Planck, que aqui apareceu pela primeira vez nas aulas sobre a interação radiação- matéria. Que a ordem de grandeza da constante de Planck não faz parte da escala de ordem de grandeza do cotidiano das pessoas, também foi compreendido

pelos nossos alunos, bem como o entendimento de que essa constante pode ser encarada como o limite de aplicação da Física Clássica.

O entendimento de que em física quântica, o fenômeno deve ser considerado na sua totalidade e, que um determinado objeto quântico, dependendo da arranjo experimental, pode ser um fenômeno ondulatório ou corpuscular, mas não ambos simultaneamente, segundo a Interpretação da Complementaridade, foi entendido pela maioria do alunos.

A possibilidade da luz, encarada inicialmente como onda, associada a um determinado experimento ser um fenômeno corpuscular, assim como, o elétron, tido inicialmente como partícula, associado a um determinado experimento, constituir-se num fenômeno ondulatório, não é mais novidade para nossos alunos.

Isto tudo posto justifica a validação de nossa proposta em princípio, pois é evidente que ajustes serão necessários, tanto na proposta como na ação pedagógica, visto que “no hay camino , se hace camino al andar” (ANTÔNIO MACHADO).

9 REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Influências da física moderna na obra de Salvador Dalí. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, 2007. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6243/5794>>. Acesso em: 10 agosto 2014.

ARLEGO, M. J. F. Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria- utilizando el concepto de integral de camino. **Revista Electrónica de Investigación Educación en Ciencias**, ano 3, n. 1, 2008. Disponível em: <http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano-3-nro1/REIEC_ano3_num1_art6.pdf?attredirects=0> Acesso em: 03 maio 2014.

BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto. 2011, 316p. 9ª Reimpressão. [Tradução Estela dos Santos Abreu].

_____. **O novo espírito científico**. 2ª edição. Edições Tempo Brasileiro. 1985. 151p. [Tradução Juvenal Hahne Júnior].

_____. **A filosofia do Não**. Filosofia do novo espírito científico. 3ª edição. Lisboa: Editorial Presença. 1984. 138p. [Tradução Joaquim José Moura Ramos].

_____. **O racionalismo aplicado**. Zahar Editores. 1977. 244 p. [Tradução Nathanael C. Caixeiro].

_____. **El materialismo racional**. Buenos Aires, Paidós. 1976. [Tradução Elsa Repetto e Nor, a Martinez Castrillón].

BROCKINGTON, Guilherme. **A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do ensino médio**. 2005. 268 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências)- Instituto de Química, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.

BOHR, Niels. **Física atômica e conhecimento humano**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Contraponto. 1996. 140p. [Tradução de Vera Ribeiro].

BUNGE, Mario. **Epistemologia**: curso de atualização. T. A. Queiroz, Editor e Editora da Universidade de São Paulo. 1980. 246 p. [Tradução de Claudio Navarra].

_____. **Ciência e desenvolvimento**. Editora Itatiaia limitada e Editora da Universidade de São Paulo. 1980. 135 p. [Tradução de Cláudia Regis Junqueira].

CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JÚNIOR, O.; SILVA, J. L. P. B. Improving students' meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID207/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

COSTA, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Salvador Dalí e a mecânica quântica. **A física na escola**, v. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a06.pdf>>. Acesso em: 03 agosto 2014.

CUPPARI, A., RINAUDO, G., ROBUTTI, O., VIOLINO, P. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. **Physics Education**, Bristol, v. 32, n. 5, p.302-308, Sept. 1997.

DAGOGNET, François. **Bachelard**. Lisboa: Edições 70. 1980. 102p. [Tradução Alberto Campos].

DOCA, Ricardo Helou; GUALTER, José Biscuola; NEWTON, Villas Bôas. **Física**. São Paulo: Saraiva, 2010. v.3.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor. 2008. 244 p. [Tradução de Giasone Rebuá].

FANARO, M. A.; ARLEGO, M.; OTERO, M. R. El Método de Caminos Múltiples de Feynman como Referencia para Introducir los Conceptos Fundamentales de la Mecánica Cuántica en la Escuela Secundaria. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/1090/849>>. Acesso em: 03 maio 2014.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; ARLEGO, M. Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. **Investigação em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009a. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID205/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A. Teoremas-en-acto y conceptos-en-acto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, n. 3, 2009b. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revistas/V9N3/v9n3a1.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2014.

FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions **International Journal of Science Education**, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a Física**. São Paulo: Ática, 2010, v.3.

GIL, D. P., SENENT, F., SOLBES, J. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en La enseñanza media. **Revista de Enseñanza de la Física**, Rosario, v. 2, n. 1, p. 16-21, abr. 1988.

_____. La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, p. 209-210, set. 1987. n. extra.

GIL, D. P., SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, London, v. 15, n. 3, p. 255-260, May/June 1993.

GONÇALVES FILHO, Aurélio; TOSCANO, Carlos. **Física e realidade**. São Paulo: Scipione, 2010, v.3.

HESEEN, JOANNES. **Teoria geral do conhecimento**. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JAPIASSU, Hilton. **Introdução ao pensamento epistemológico**. 7ª edição. Rio de Janeiro: F. Alves. 1992. 202p.

JOHANSSON, K. E.; MILSTEAD, D. Uncertainty in the classroom – teaching quantum physics. **Physics Education**, v. 43, n. 2, 2008. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/43/2/006/pdf/0031-9120_43_2_006.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

KANTOR, Carlos; PAOLIELLO JR., Lilio A.; MENEZES, Luis Carlos de; BONETTI, Marcelo de C.; CANATO JR., Osvaldo; ALVES, Viviane M. **Quanta Física**. São Paulo: PD, 2010. v.3.

KAZUHITO, Yamamoto; FUKU, Luiz Felipe. **Física para o ensino médio**. São Paulo: Saraiva, 2011, v.3.

KLEIN, Étienne. **A Física Quântica**. Lisboa: Instituto Piaget, 1996. 129p. [Tradução João C. S. Duarte].

LOPES, Alice Casimiro. **Currículo e epistemologia**. Ijuí: Unijuí, 2007. 232p.

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ÁLVARES, Beatriz Alvarenga. **Curso de Física**. São Paulo: Scipione, 2010, v.3.

MOREIRA, Marco Antônio. **Metodologia de pesquisa em ensino**/Marco Antônio Moreira. 1ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2011. 242p.

_____. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (semtec). **PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/Semtec. 2002.

_____. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Básica (SEB). **Orientações Curriculares para o Ensino Médio**. Brasília: MEC/SEB. 2008.

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**, v.5, n.1, 2000. Disponível

em:<http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID57/v5_n1_a2000.pdf>. Acesso em: 12 agosto 2014.

OSTERMANN, F; RICCI, T. **Uma introdução conceitual à mecânica quântica para professores do ensino médio**. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2003. (Textos de apoio ao professor de Física, n.14).

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, 2009. Disponível em:<http://saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>. Acesso em: 12 agosto 2011.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193 - 203, (2005). Disponível em <www.sbfisica.org.br>

OTERO, M. R.; FANARO, M. A.; ARLEGO, M. Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. **Revista Electrónica de Investigación en Educación em Ciencias**, ano 4, n. 1, 2009. Disponível em:<http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano4-nro-1/REIEC_anio4_num1_art6.pdf?attredirects=0>. Acesso em: 03 maio 2014.

PAULO, I. J. C. de. **Elementos para uma proposta de inserção de tópicos de física moderna no ensino de nível médio**. Cuiabá: Instituto de Educação – UFMT, 1997. Diss. Mestr. Educação.

PESSOA Junior, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**/ Osvaldo Pessoa jr. 3ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2006.189p.

PIETROCOLA, Maurício; POGIBIN, Alexandre; ANDRADE, Renata de; ROMERO, Talita Raquel. **Física em contextos: pessoal, social e histórico**. São Paulo: FTD, 2011. v.3.

PINTO, A.C., ZANETIC, J. É possível levar a Física Quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999. Disponível em:<<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/6873/6333>>. Acesso em 12 agosto 2014.

POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? **Physics Education**, v. 34, n. 5, 1999. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/34/5/307/pdf/00319120_34_5_307.pdf>. Acesso em 12 agosto 2011.

RUZZI, M. Física Moderna: teorias e Fenômenos. 2ª edição. Curitiba: editora IBPEX, 2008.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de**

Física, v. 30, n. 3, Seção Produtos e Materiais Didáticos, 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/303501.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2014.

SANT'ANA, Blaide; MARTINI, Gloria; REIS, Hugo Carneiro; SPINELLI, Water. **Conexões com a Física**. São Paulo: Moderna, 2010.v.3.

SILVA, A. C. da; ALMEIDA, J. P. M. de. Física Quântica no Ensino Médio: o que dizem as pesquisas. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez. 2011. Disponível <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n3p624>>. Acesso em 12 agosto 2014.

SILVA, Claudio Xavier da; BARRETO FILHO, Benigno. **Física aula por aula**. São Paulo: FTD, 2010, v.3.

SILVA, Ilton Benoni da. **Inter-relação: a pedagogia da ciência: uma leitura do discurso epistemológico de Gaston Bachelard**. 2ª edição. Ijuí: Unijuí, 2007.176p.

SOLBES, J., CALATAYUD, M. L., CLIMENT, J. B., NAVARRO, J. Diseño de un currículum para la introducción del modelo atómico cuántico. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 5, p. 209-210, sept. 1987a. n. extra.

_____. Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v.5, n.3, p. 189-195, nov. 1987b.

HESEEN, JOANNES. **Teoria geral do conhecimento**. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

TORRES, Carlos Magno A.; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Física Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Moderna, 2010. v.3.

APÊNDICE A–Texto de apoio sobre realismo e antirrealismo

A discussão proposta neste texto de apoio tem a intenção de fornecer aos alunos os subsídios necessários para uma melhor compreensão do princípio da complementaridade de Bohr e as sua principal diferença em relação às interpretações realistas da Mecânica Quântica. Em particular, favorecer o entendimento da dualidade onda-partícula, bem como provocar discussões acerca de aspectos filosóficos sobre a realidade e a objetividade da natureza.

O realismo científico e o antirrealismo

Na primeira metade do século XX surge a Mecânica Quântica, como uma nova maneira de enxergar o mundo, que num primeiro momento parece estar em desacordo com as teorias da física clássica e em total desacordo com o senso comum. Para o seu entendimento são necessárias novas ideias, novos pensamentos e uma nova percepção das coisas, visto que a noção de natureza, na Mecânica Quântica, parece estar além da imaginação. A grande relevância da imaginação nas ciências de um modo geral é destacada por Richard Feynman:

Eu lhes peço que imaginem os campos magnéticos e elétricos. O que fazem? Sabem como? Que eu vejo normalmente? Quais são as exigências da imaginação científica? É algo diferente de imaginar uma sala cheia de anjos invisíveis? Não, não é como imaginar anjos invisíveis. É necessário um grau maior de imaginação para compreender o campo eletromagnético que para compreender anjos invisíveis. Por quê? Porque para se compreender os anjos invisíveis, tudo o que tenho que fazer é alterar suas propriedades um pouquinho – imagino-os ligeiramente visíveis e então posso ver as formas de suas asas e de seus corpos. Uma vez que consigo imaginar um anjo visível, a abstração necessária – que torne os anjos quase invisíveis é imaginá-los completamente invisíveis – é relativamente fácil. Então vocês dirão: “professor, me dê uma descrição completa de ondas eletromagnéticas, embora seja ligeiramente inexata, de modo que eu possa vê-las como posso ver os anjos invisíveis.” Eu sinto que não posso fazer isso. Não sei como fazê-lo. Não tenho nenhuma imagem do campo eletromagnético que de algum modo seja precisa. [...] Nossa ciência apresenta terríveis dificuldades de imaginação. O grau de imaginação necessário é muito mais extremo que o necessário para algumas ideias antigas. As ideias modernas são muito difíceis de imaginar. E usamos muitas ferramentas. Usamos equações e regras matemáticas e construímos um montão de imagens. [...] Se deve ter suficiente imaginação para se conceber algo que nunca tenha sido visto ou ouvido (FEYNMAN, 1964, p.20 apud BROCKINGTON, 2005, p.27).

No contexto da Mecânica Quântica a relação do homem com a natureza é modificada, abrindo espaço para uma profunda análise das concepções de ciência e sua capacidade de construção de imagens da realidade, concomitantemente com um importante debate filosófico. Na mecânica quântica a resposta à pergunta: o que é real, não é tão simples.

Deste debate, principalmente sobre a existência ou não de uma realidade independente e da possível possibilidade de acessá-la, surgiram duas correntes filosóficas antagônicas que buscam, ambas, compreender e revelar as relações entre o conhecimento humano e a realidade ao qual o conhecimento se refere: o Realismo e o Antirrealismo.

O realismo sustenta que o mundo físico existe independentemente do pensamento e da percepção humana, diferenciando o que existe realmente e o que se acredita que existe. O antirrealismo, ao contrário, afirma que o mundo físico é de algum modo dependente da atividade consciente dos seres humanos.

Para muitas pessoas, o realismo parece mais plausível do que o antirrealismo. Pois o realismo se acomoda bem à perspectiva do senso comum de que os fatos sobre o mundo estão “lá fora” esperando serem descobertos por nós, ao passo que o antirrealismo não.

É possível distinguir o realismo em um sentido ontológico, relativo às essências das coisas, cuja tese defende a existência de uma realidade independente de nossa mente, de nossa observação e em um sentido epistemológico, relativo ao conhecimento, que defende a tese que é possível conhecer esta realidade e que a teoria científica também se aplica para a realidade não observada. Ao considerar o conhecimento científico o realismo epistemológico assume a forma do chamado realismo científico.

Na visão realista, apesar do ser humano criar representações mentais e linguísticas, ao eliminar-se o sujeito e a consciência, esta realidade autônoma continuará existindo.

No século XIX o termo *realismo* surgiu principalmente nas artes como reação ao *romantismo*, realçando o cotidiano e o social, se colocando numa posição política mais progressista. Particularmente nas ciências o realismo desta época estava associado ao mecanicismo e ao atomismo, valorizando a quantificação e o método hipotético-dedutivo, em oposição ao positivismo de Comte que defendia a tese de que qualquer especulação sobre mecanismos ocultos deveria ser evitada. Para o positivismo só teria sentido tecer afirmações sobre o que é observável ou verificável e a análise da realidade deve ser feita através das observações e das constatações racionais.

Já no século XX, particularmente no final da década de 1920, se estabelece uma nova Mecânica Quântica, e todas tentativas realistas para interpretá-la fracassam. A visão que se impõe quase unânime destaca uma conexão íntima entre o sujeito e o objeto e na década de 1930 diversas correntes idealistas (antirrealistas) propõe a inseparabilidade entre o sujeito e o objeto.

Após a segunda grande guerra ocorre uma reação às interpretações idealistas da Mecânica Quântica por uma visão que eliminasse o observador humano da descrição quântica da natureza, tal visão, realista objetivista, concebe uma realidade que pode ser descrita mesmo na situação em que não haja observador.

Já na década de 1990, quando parecia que o sujeito poderia ser eliminado da Mecânica Quântica, ressurgem as posições idealistas (antirrealistas).

Na história da Mecânica Quântica o antirrealismo nos leva a noção de complementaridade defendida por Bohr em 1928: “uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes de observação”. Bohr defendia que a teoria só trata do observável, isto é, uma realidade não-observada pode até existir, mas ela não é descritível pela linguagem humana. A posição de Bohr modifica-se a partir de 1935 quando passa a dar ênfase para o “todo” do arranjo experimental. Junto com esta concepção de totalidade Bohr também defende uma concepção “relacionista” segundo a qual a realidade observada é fruto da relação entre o sujeito e o objeto, sendo dependente das escolhas e da vontade do observador.

Esta noção de complementaridade defendida por Bohr vem a se constituir na interpretação da complementaridade (ortodoxa ou de Copenhagen), a qual é, atualmente, a interpretação da mecânica quântica mais aceita pela comunidade científica.

A metáfora da árvore:

Essa metáfora tem suas limitações, pois trata-se de um fenômeno macroscópico em vez de escala atômica, nível no qual a Teoria Quântica é empregada. No entanto, o papel do observador (em uma abordagem mais filosófica sobre a realidade física) foi discutido de diversas formas por vários cientistas que contribuíram com a Teoria Quântica.

Que som faz uma árvore ao cair se não houver ninguém para ouvi-la?

Provavelmente não há uma única e correta resposta a essa pergunta, mas é possível traçar um paralelo entre várias correntes filosóficas e as respostas dada a esta pergunta.

Alguns defendem que a árvore ao cair emiti o mesmo som que sempre emitiu, haja alguém para ouvir ou não. É uma concepção de **realismo**, num entendimento de que existe uma realidade independente, exterior à mente humana e a sua percepção. Nesse sentido, com fre-

quência, a concepção realista está associada a uma visão determinística, o que significa que qualquer consequência pode ser explicada por uma causa bem determinada.

Os defensores da visão **antirrealista** diriam que a árvore pode emitir múltiplos sons ao cair, ou mesmo não emitir som algum, e que descrever esse fenômeno envolve considerar todas as alternativas. Somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência. Em outras palavras, observar a queda da árvore é que determina o seu estado, se ele emite ou não som ao cair (e qual som). É, de certo modo, o que faz a interpretação de Copenhagen, expressão que se refere ao entendimento que Bohr e seus seguidores deram à Mecânica Quântica. Nela, rejeita-se a ideia de uma realidade objetiva que independe do observador; é a nossa forma de medição que define a natureza do que é medido. E isso não caracteriza uma contradição da natureza, mas um sentido de complementaridade em que todos os estados a formam. É possível dizer que esta posição está ligada com uma espécie de idealismo, corrente para a qual o mundo físico depende de algum modo da atividade consciente dos seres humanos.

Outras correntes, que podem estar interligadas com as anteriores e entre si, são as do Instrumentalismo e do Empirismo.

Para o **Instrumentalismo**, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante era que o modelo utilizado para descrever sua queda funcionava e, quando alguém a ouvia, era o som predito pelo modelo. Segundo essa visão, a Física Quântica importa-se apenas com a capacidade de previsão de seus resultados. Sua formulação é capaz de explicar ou descrever os fenômenos estudados, não havendo necessidade de buscar uma interpretação ou uma existência real para os conceitos utilizados ao se fazer isso.

Para o **Empirismo**, a própria pergunta não faria sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento. Se não havia ninguém para ouvir a árvore, não haveria como saber o som que ela faria. Portanto, se não existir um meio de verificar se uma sentença é verdadeira ou falsa, não faz sentido se preocupar com tal questão.

APÊNDICE B– Texto de apoio sobre a interação entre a radiação e a matéria

Com este texto de apoio pretendemos destacar que existem fenômenos que a Física Clássica não consegue explicar e que as teorias são aplicáveis em determinados contextos, isto é, se num determinado contexto uma teoria faz previsões errôneas, não há alternativa além de utilizar novas teorias, como a Mecânica Quântica, por exemplo.

Interação entre a radiação e a matéria

Objetos da Física Clássica

Na Física Clássica temos dois tipos de objetos cujos conceitos são familiares: os corpúsculos e as ondas.

Os corpúsculos (partículas) são entidades puntiformes bem localizados numa determinada região e em qualquer instante sua posição, sua velocidade e sua trajetória são bem determinadas, apresentando dimensões desprezíveis, isto é, em condições normais não se dividem (indivisibilidade).

As ondas são concebidas pela física clássica como excitações que se propagam em um meio transportando energia e informação, que se identificam com o movimento oscilatório das partículas do meio. Ao contrário dos corpúsculos, as ondas não estão bem localizadas, elas são espalhadas ocupando certa região espacial, apresentando, por tanto, um movimento deslocalizado. Outra diferença relevante é o fato das ondas não apresentarem a característica de serem indivisíveis.

Nas interações entre partículas a troca de energia ocorre instantaneamente, em pancadas ($\Delta t = 0$), como nas colisões. Já as interações entre ondas é bastante diferente visto que elas interferem umas com as outras. A maneira como as ondas transferem energia também é diferente do caso das partículas, pois elas estão espalhadas numa determinada região do espaço e é necessário um determinado intervalo de tempo diferente de zero para que se efetue a transferência de energia ($\Delta t \neq 0$). Esta transferência se dá continuamente. Para exemplificar esta segunda situação, consideramos um barril flutuando no mar durante a passagem de uma onda, a transferência de energia da onda para o barril é contínua (não em pancadas) e necessita de certo tempo diferente de zero. Importante lembrar que a energia de uma onda é proporcional a sua amplitude.

Radiação Eletromagnética

As radiações eletromagnéticas, por verificarem vários fenômenos ondulatórios (reflexão, refração, difração, interferência, polarização) são consideradas ondas eletromagnéticas e transportam energia através do espaço da mesma forma que qualquer onda transporta energia. As ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos oscilantes. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é igual à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s. A sua intensidade é proporcional à amplitude dos campos elétrico e magnéticos. Quanto maior a intensidade, maior a energia transportada pela onda.

O **espectro eletromagnético** representa o **conjunto de todas as ondas eletromagnéticas de diferentes frequências**. Algumas são visíveis, podendo ser captadas pelo olho humano, no entanto, a maior parte delas é invisível aos nossos olhos. Ele encontra-se dividido em zonas distintas: frequência extremamente baixa; frequência muito baixa; ondas de rádio; micro-ondas; infravermelhos; luz visível; raios ultravioletas; raios X, raios Gama.

Fig. 1 - Espectro eletromagnético em função da frequência e do comprimento de onda

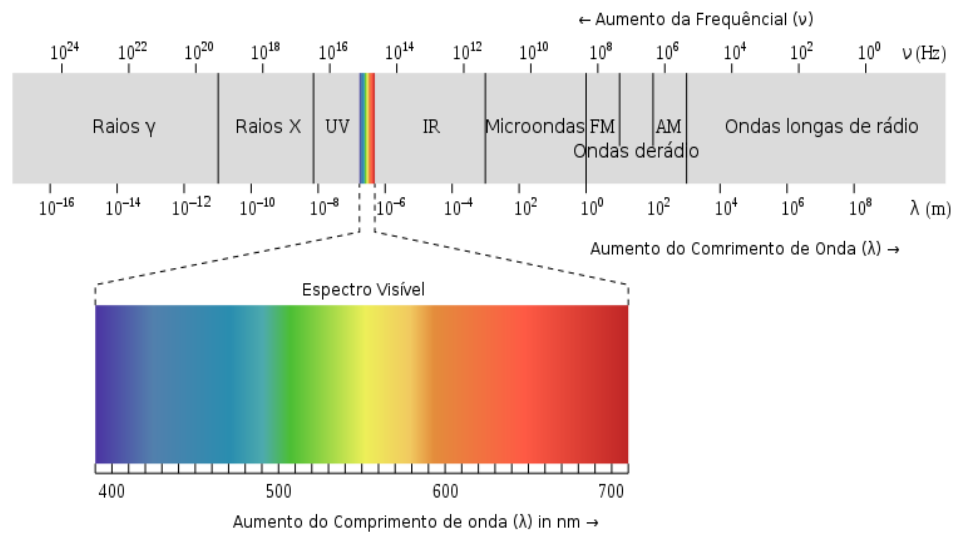
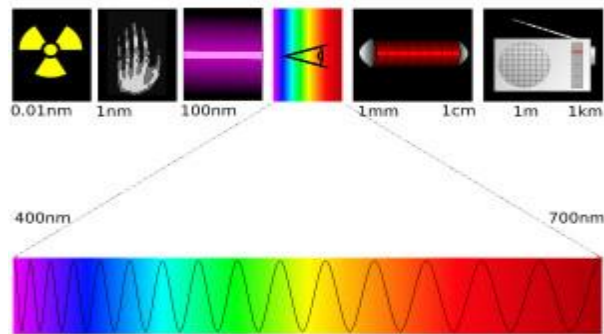


Fig. 2 - Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda



Efeito Fotoelétrico

A teoria do eletromagnetismo elaborada por Maxwell, que estabelece que a luz é uma onda eletromagnética, foi confirmada experimentalmente por Hertz em 1888. Esta teoria faz parte de um dos pilares da física clássica. No entanto, a teoria clássica do eletromagnetismo começou a demonstrar certa fragilidade a partir de uma observação experimental, também realizada por Hertz ao estudar as descargas elétricas entre duas esferas de zinco. Hertz observou que era muito mais fácil obter as descargas elétricas entre as esferas quando uma delas era iluminada com luz ultravioleta, donde concluiu que a luz poderia interferir nas propriedades elétricas dos objetos.

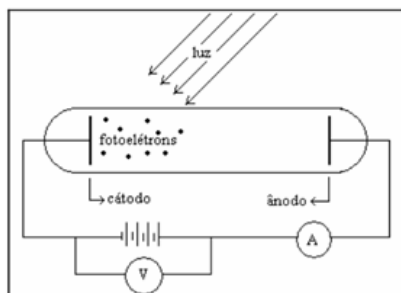
Em 1889, Thomson explicou esse efeito, postulando que a descarga era facilitada devido à emissão de elétrons do metal quando iluminado por luz ultravioleta.

A liberação de elétrons devido à incidência de luz é o que determinamos atualmente como efeito fotoelétrico. O efeito é devido basicamente devido à transferência de energia da radiação para os elétrons que estão sendo incididos.

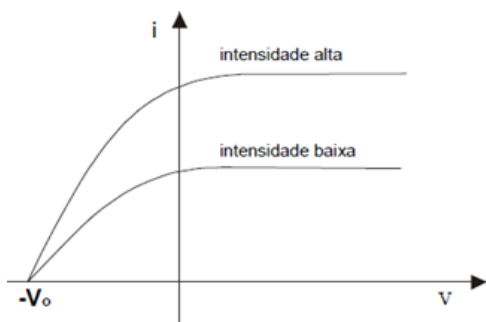
Nosso estudo sobre o efeito fotoelétrico será feito através da experiência feita por Philipp Lenard que investigou mais detalhadamente as suas características em 1902, destacando o que pode ser explicado, bem como, o que não pode ser explicado pela teoria clássica do eletromagnetismo.

Em um recipiente de vidro com vácuo, ele incidiu de cada vez luz de diversas cores (ou seja, diversas frequências), sobre a placa emissora (cátodo). Ele media então a corrente elétrica que era captada pela placa coletora (ânodo). O esquema desta experiência está representado na figura abaixo:

Fig. 3 - Aparato experimental para verificação do efeito fotoelétrico



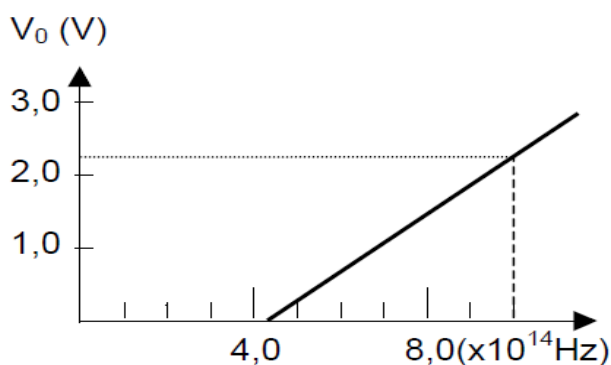
O potencial da fonte de tensão é ajustável, podendo inclusive fornecer potenciais negativos. Se o potencial aplicado for nulo, os elétrons serão ejetados, no cátodo pela incidência de luz, nas mais variadas direções e com diferentes energias, podendo, alguns deles, chegarem ao ânodo, e outros não. O aumento do potencial aplicado faz com que todos os elétrons liberados sigam acelerados em direção ao ânodo, aumentando a corrente registrada no amperímetro. Um pequeno aumento no potencial já é suficiente para que todos os elétrons se orientem em direção ao ânodo e cheguem ao ânodo, de tal forma que aumentos maiores no potencial aplicado não influem na corrente medida, a qual praticamente se mantém constante. Com a aplicação de um potencial negativo, alguns elétrons retornam ao cátodo. Este potencial negativo pode assumir um determinado valor que anule a corrente registrada no amperímetro. Este potencial, que anula a corrente, é denominado potencial de parada ou, ainda, potencial de corte (V_0). Verifica-se a seguinte relação entre o a intensidade da corrente e o potencial de corte, observe que a figura mostra, também, a relação entre a intensidade da radiação incidente e o potencial de corte:

Fig.4 – Gráfico i versus V 

Note que estranhamente o potencial de corte não depende da intensidade da radiação. Lembrem que a energia de uma onda é proporcional a sua intensidade. Logo, pensando classicamente, este resultado significa que a energia dos elétrons ejetados não depende da energia que recebem da onda incidente. Como explicar este fato?

Ainda de acordo com a teoria clássica, o efeito fotoelétrico deveria acontecer para qualquer frequência da luz incidente. No experimento de Lenard foi observada a existência de uma frequência mínima da radiação incidente capaz de liberar elétrons do material que constitui o ânodo. Para valores menores do que esta frequência não ocorre a liberação de elétrons. Esta frequência mínima é denominada frequência de corte f_0 . Os resultados experimentais mostram a seguinte relação entre o potencial de corte e a frequência:

Figura 5 - gráfico do potencial de frenagem para o sódio em função da frequência



Ou seja, o potencial de corte não depende da intensidade da onda incidente, mas depende linearmente da frequência, sendo que o efeito só é observado a partir de uma certa frequência. Isto implica que a energia dos elétrons ejetados depende da frequência da luz incidente, contrariando a física clássica. Lembramos que segundo a física clássica, que a energia dos elétrons ejetados não deveria depender da frequência da onda incidente e sim da sua intensidade.

A experiência ainda demonstra mais um problema para a física clássica. Como a interação é uma interação entre uma onda e uma partícula, deveria haver um tempo para o que os elétrons recebessem a energia da onda e fossem emitidos. Este tempo não é verificado.

Resumindo: pela teoria clássica, um aumento na intensidade da radiação incidente deveria provocar um aumento na energia cinética dos elétrons ejetados, visto que eles estariam recebendo uma quantidade maior de energia. Também deveríamos observar um tempo entre a incidência da radiação e emissão do elétron, pois trata-se de uma interação onda-partícula. Por fim, para uma dada intensidade, o efeito deveria ocorrer para qualquer frequência. No entanto, observamos o seguinte:

- a) A energia cinética dos elétrons emitidos não depende da intensidade da radiação incidente e sim da frequência.
- b) Não existe um tempo detectável entre a emissão do elétron e incidência da radiação.
- c) Existe uma frequência de corte, abaixo da qual não ocorre o efeito.

Estes três fatos nos levam a concluir que a interação entre a radiação e a matéria, nesta experiência, não é do tipo onda-partícula como descrita anteriormente. Esta experiência evidencia um postulado central da mecânica quântica: o postulado quântico. Este postulado afirma que as interações fundamentais da natureza (neste caso a interação eletromagnética) são discretizadas. Em outras palavras: no mundo microscópico, a interação entre radiação (onda eletromagnética) e matéria (elétrons) se dá através de pacotes de energia, como se fosse uma interação do tipo partícula-partícula. Para cada interação fundamental interpretamos este pacote de energia (também chamado de quantum de energia) como uma partícula associada à interação. No caso da interação eletromagnética, esta partícula é chamada de fóton. Falaremos brevemente sobre as demais interações a seguir.

Para explicar quantitativamente o efeito fotoelétrico, cada pacote de energia (fóton) tem que ter uma energia proporcional à frequência da radiação, dada pela relação:

$$E_{\text{fóton}} = h \cdot f.$$

A constante de proporcionalidade h é conhecida como sendo a constante de Planck, cujo valor é $4,2 \times 10^{-15}$ eV.s ou $6,6 \times 10^{-34}$ J.s Esta é a constante fundamental que determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada.

Notem que a constante de Planck tem um valor muito pequeno em relação à escala humana, da ordem de 10^{-34} em J.s. Para termos ideia, soltemos um bloco de 1 kg de altura de 1 m. O bloco demora aproximadamente 0,4 segundos para chegar ao solo e a energia mecânica do bloco é da ordem de 10 Joules. Logo a escala típica de energia vezes tempo deste problema macroscópico é de $10 \times 0,4$ Js. Compare com a constante de Planck!

Devido ao valor muito pequeno da constante de Planck, a discretização da energia fornecida pela radiação aos elétrons só é evidenciada em altas frequências (veja equação acima). Por sua vez, altas frequências implicam em pequenos comprimentos de onda. Pequenos comprimentos de onda só podem ser medidos em escalas de distância muito pequenas. Logo, evidenciamos que no fim, a discretização da interação entre a radiação e a matéria só é observada em escalas muito pequenas de distância.

Grandezas Quantizadas e as Interações fundamentais da Natureza

A palavra *quantum* (plural = *quanta*) é uma palavra latina e significa *quantidade*. Em física a palavra quantum é usada para designar a menor quantidade em que uma grandeza ou propriedade é encontrada na natureza.

Um bom exemplo de grandeza quantizada é a carga elétrica. A menor unidade com que a carga elétrica aparece livremente na natureza, denominada carga elementar, é a carga do elétron, ou do próton (que diferem em sinais). Dessa maneira cargas elétricas só existirão em números múltiplos da carga elementar ($Q = n.e$). Grandezas com essa característica, múltiplos de um *quantum*, são ditas quantizadas ou discretizadas. Exemplos: carga elétrica, energia, massa, radiação.

É possível fazer uma analogia com conjuntos numéricos: grandezas contínuas com o conjunto dos números Reais e as quantizadas com o conjunto dos números Naturais.

O postulado quântico, evidenciado no efeito fotoelétrico afirma que as interações fundamentais da natureza, quando observadas em escalas microscópicas, são discretizadas. Isto significa que, como discutido anteriormente, todas as interações podem ser entendidas num modelo de interação do tipo partícula-partícula. Importante lembrar que este é um modelo para entendermos, usando a linguagem que estamos acostumados (a linguagem clássica), como as interações fundamentais “funcionam”, no nível microscópico (discutiremos mais sobre o uso da linguagem clássica no próximo texto de apoio). As partículas associadas à interação (o quantum de energia) são chamadas de os quanta da interação. Os quanta da interação eletromagnética são os fótons, mas e as demais interações?

Na natureza existem 4 interações fundamentais. O eletromagnetismo é a interação que estudamos no efeito fotoelétrico. Ainda temos:

a) nuclear forte, que atua somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta da interação da interação nuclear forte são chamados de Gluons.

b) a interação nuclear fraca, que também atuam somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta da interação nuclear fraca são chamados de W^+ , W^- e Z^0 .

c) A interação gravitacional. Quais são os quanta da interação gravitacional? Ainda não foi feita uma experiência que detecta-se a discretização da interação gravitacional. Também entendemos do ponto de vista teórica quando conciliar a interação gravitacional com o postulado quântico. Este é um dos maiores problemas da física atual.

APÊNDICE C– Texto de apoio para o estudo sobre dualidade onda-partícula

Este texto de apoio tem a intenção de afirmar o fenômeno da dualidade onda partícula como um dos pilares da Mecânica Quântica, destacando a interpretação probabilística dos fenômenos físicos, bem como a relação entre o observador e a medida, no que se refere a sua totalidade e a sua completeza.

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Introdução

A física quântica surge com a necessidade do desenvolvimento da física atômica, visto que a física clássica apresentava limitações no estudo da constituição da matéria e com a respectiva crise da representação do mundo microscópico que pode ser caracterizada pela evolução dos diversos modelos atômicos.

No início do século XIX, a partir das leis ponderais da reações químicas John Dalton dá um caráter científico à ideia de átomo, considerando-o como uma minúscula partícula material indestrutível, mantendo massa e dimensão inalterável.

Já no século XX, Ernest Rutherford apresenta uma nova face para o átomo, discordando da indivisibilidade do mesmo, a partir existência das partículas α , β e raios γ . Rutherford fez, então, as seguintes proposições:

- O átomo deve ser constituído de uma parte central e que foi denominado núcleo. Este deve ter carga positiva, pois repele violentamente as partículas α , que possuem carga positiva, quando estas passam próximo ao núcleo.

- O tamanho do núcleo deve ser extremamente pequeno em relação ao átomo.

- Se o átomo tivesse apenas núcleos positivos, qualquer matéria seria muito positiva. Para contornar este fato, Rutherford admitiu que a carga nuclear seria equilibrada por elétrons, com carga negativa. No entanto, estes elétrons não poderiam estar parados, pois seriam atraídos para o núcleo e o átomo seria um sistema instável.

- Admitiu, então, um equilíbrio dinâmico: “os elétrons devem girar em torno do núcleo, em órbitas circulares”.

- Como o átomo é eletricamente neutro, a carga total dos elétrons deve ser igual à carga no núcleo.

No entanto, a teoria de Rutherford apresentava uma contradição. Segundo a teoria clássica do eletromagnetismo, qualquer carga elétrica acelerada emite energia na forma de onda eletromagnética.

O elétron em movimento circular está sujeito a uma aceleração centrípeta e, deve emitir continuamente energia, perdendo, desta forma, velocidade e para manter o equilíbrio com o núcleo, seria necessário diminuir o raio da trajetória. Desta forma o movimento do elétron teria, então, uma trajetória em espiral e o elétron cairia no núcleo e qualquer átomo teria uma estrutura instável.

O físico Niels Bohr foi quem introduziu a justificação energética para o elétron, aceitando o modelo de Rutherford e considerando os estudos dos espectros de emissão do hidrogênio.

Supôs que nem todas as leis da física clássica deveriam ser seguidas pelas partículas constituintes do átomo. Os constituintes do átomo passam a respeitar novas leis que são baseadas na mecânica quântica.

Baseando-se na teoria dos quanta de Max Planck e na explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico, que consideram que a energia se propaga na forma de pacotes (quanta), Bohr propôs o seguintes postulados:

Postulado 1. Em um átomo são permitidas somente algumas órbitas circulares ao elétron, sendo que em cada uma dessas órbitas o elétron apresenta energia constante.

Postulado 2. Um elétron não pode assumir qualquer valor de energia, mas somente determinados valores que correspondam às órbitas permitidas, tendo, assim, determinados níveis de energia ou camadas energéticas.

Postulado 3. Um elétron, quando localizado em uma dessas órbitas, não perde nem ganha energia espontaneamente. Por isso, diz que, nesse caso, ele assume um estado estacionário.

Postulado 4. Um elétron pode absorver energia de uma fonte externa somente em unidades discretas (pequenas), chamadas quanta (forma singular: quantum).

Postulado 5. Quando um elétron absorve um quantum de energia, ele salta de uma órbita mais energética, ligeiramente mais afastada do núcleo. Dizemos que o elétron realizou um salto quântico e atingiu um estado excitado.

Postulado 6. Quando o elétron retorna a órbita menos energética, ele perde, na forma de onda eletromagnética, uma quantidade de energia que corresponde à diferença de energia existente entre órbitas envolvidas no movimento do elétron.

Segundo Bohr os elétrons giram ao redor do núcleo em órbitas circulares bem definidas e, espontaneamente, ao fazê-lo, eles não irradiam energia e quando um elétron passa de uma órbita para outra, ele emite ou absorve, determinada energia dada pela expressão: $\Delta E = h \cdot f$.

Bohr, também descobriu um método para calcular as energias dos estados estacionários do átomo de hidrogênio, postulando que as órbitas do elétron são circulares e que o momento angular do elétron no estado fundamental é $h/2\pi$, no primeiro estado excitado é $2h/2\pi$, no estado seguinte é $3h/2\pi$, e assim por diante. De acordo com Bohr:

$$L = nh/2\pi, \text{ com } n=1,2,3, \dots$$

O número n , introduzido dessa maneira na teoria de Bohr, é chamado de número quântico principal da órbita de Bohr.

A teoria de Rutherford-Bohr foi muito bem sucedida para átomos de um elétron. Quando se tratava de átomos mais complexos houve a necessidade de adaptar novas grandezas quânticas.

Foi Sommerfeld quem deu o primeiro passo para na ampliação da teoria de Bohr, admitindo a possibilidade de órbitas elípticas com diferentes excentricidades para um mesmo número quântico principal. Introduzindo, desta forma, um segundo número quântico l , denominado número quântico secundário.

Os valores de l variam de zero até $(n-1)$. Quanto maior o valor de l a elipse é mais arredondada. Um l máximo corresponderia uma órbita circular. Na camada M ($n=4$), os possíveis valores são: $l=0, 1, 2$ e 3 .

Ainda na evolução dos modelos atômicos surgem mais dois números quânticos, o número quântico magnético (m_l) e o número quântico de spin (m_s). O número quântico magnético está relacionado com o campo magnético devido ao movimento do elétron em torno do núcleo. Verificou-se que esse número quântico magnético pode ter valores inteiros no intervalo: $(-l, \dots, 0, \dots, +l)$. O número quântico de spin está relacionado com a rotação do elétron, que também gera campo magnético. A interação entre os campos magnéticos, devidos aos dois tipos de movimento do elétron, modifica a energia do sistema. As duas orientações do spin correspondem a dois níveis de energia próximo um do outro.

Na sequência, para a descrição do mundo microscópico, surge a Física quântica rompendo com a linguagem comum, com o visual, com o sensível, com o senso comum, com as metáforas intuitivas e utilizando um formalismo matemático muito forte e entidades abstratas no seu desenvolvimento.

Na física quântica a observação dos fenômenos toma um sentido muito especial, pois aqui, a observação está relacionada com o fato de que **a interação** dos objetos atômicos e dos instrumentos de medida é parte integrante dos fenômenos quânticos.

Uma das questões essenciais da Física Quântica e que a diferencia da Física Clássica, entre outras, é a questão da dualidade onda-partícula, de tal modo, que um mesmo objeto quântico pode se constituir num fenômeno ondulatório ou corpuscular dependendo do arranjo experimental.

Objetos Quânticos

Conforme já foi visto no efeito fotoelétrico, a luz é composta por fótons, que são “pacotes” de energia, cujo valor é dado por $E=h.f$. Mas afinal o fóton é uma onda ou é uma partí-

cula? Os elétrons, os prótons, os nêutrons, fótons, o átomo, etc., pertencem ao mundo microscópico. Não obedecem as leis da Física Clássica, mas da Mecânica Quântica. Podemos observar nesses objetos características ondulatórias ou corpusculares dependendo do arranjo experimental, isto é, a dualidade onda-partícula, caracterizando-os como objetos quânticos aos quais não se pode atribuir, simultaneamente, um conjunto de propriedades dinâmicas (posição, velocidade, momentum linear) bem definidas.

A mecânica quântica trabalha com sistemas formados por objetos quânticos, que, como referimos anteriormente, são objetos microscópicos. Podemos citar como modelos de objetos quânticos elétrons, prótons, nêutrons, núcleos atômicos ou moléculas, todos eles sendo objetos físicos dotados de massa. Contudo, também podemos citar como exemplos de objetos quânticos os *fótons* que formam a luz e que não possuem massa.

A diferença fundamental entre os objetos quânticos e os objetos clássicos é que nem sempre podemos atribuir aos objetos quânticos propriedades dinâmicas simultaneamente bem definidas, ou seja, na mecânica quântica nem todos os observáveis são compatíveis entre si. Por exemplo, não podemos determinar simultaneamente a posição e o *momentum* linear de um elétron. Isso não é decorrência de não possuímos aparelhos suficientemente precisos para realizar as medições necessárias, mas constitui uma limitação intrínseca à natureza dos objetos quânticos.

Entre outros fenômenos ondulatórios, **a interferência e a difração** são extremamente relevantes para o entendimento adequado do princípio da dualidade. A interferência está relacionado ao fato das ondas de mesma natureza física terem a capacidade de se sobreporem, de tal modo que o encontro de duas ou mais ondas de mesma natureza numa região do espaço gera uma outra onda, formada pela sobreposição das ondas anteriores. Tal sobreposição se dá pela soma das amplitudes, em cada ponto do espaço, das ondas componentes.

Salienta-se que a propriedade de sobreposição, isto é, de poderem se adicionar é uma exclusividade das ondas. Dois corpúsculos são incapazes de se sobreporem.

A dualidade onda-partícula parece enunciar uma contradição lógica ao dizer que partículas são ondas, isto é, afirmando que uma coisa, sem partes, é, ao mesmo tempo, partícula e onda, é indivisível e divisível, segue uma trajetória e não segue. No entanto a Mecânica Quântica não busca responder o que são os entes, ou a sua essência, mas sim, o fenômeno, que inclui o aparato de medida e o objeto que está sendo medido. A Mecânica Quântica busca conciliar esta contradição lógica através de dois enunciados diferentes para a dualidade onda-

partícula: um que busca conciliar interferência (típico de uma onda) e detecção pontual de um quantum (a indivisibilidade típica de um corpúsculo) e outro que busca conciliar a existência de interferência e de trajetórias. O primeiro enunciado, chamado de “versão fraca”, será discutido neste texto através do experimento da fenda dupla com elétrons. O outro enunciado, chamado de “versão forte”, será estudado através do experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder.

A experiência da fenda dupla

Antes da discussão da experiência da fenda dupla para luz, feito pela primeira vez por Geoffret Taylor em 1909, e também, para elétrons a partir de década de 1950, propõe-se uma sequência de experimentos mentais descritas por Etienne Klein (1996) e Ruzzi (2008).

Fenda dupla com esferas

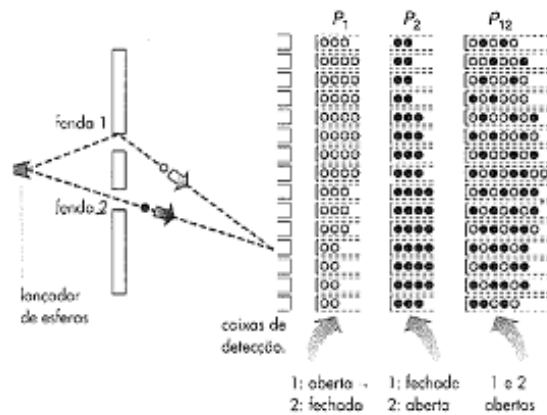
Uma máquina lança esferas com a mesma velocidade e em direções aleatórias contra uma parede com duas fendas paralelas e próximas uma da outra. Um pouco afastado desta parede encontram-se uma série de caixas que recolherão as esferas que passam pelas fendas. A maioria das esferas é travada pela parede outras passarão pela primeira ou pela segunda fenda diretamente ou ricocheteando nas suas bordas e estas serão recolhidas pelas respectivas caixas, de tal modo que o número de esferas recolhidas numa determinada caixa indica a **probabilidade** de chegada das esferas na posição determinada pela caixa em questão. Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- a) Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 1.
- b) Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 2.
- c) Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa quando ambas as fendas estiverem abertas.

É fácil constatar que:

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

Fig. 1- Dupla fenda com esferas



Fonte: Klein (1996, p.19)

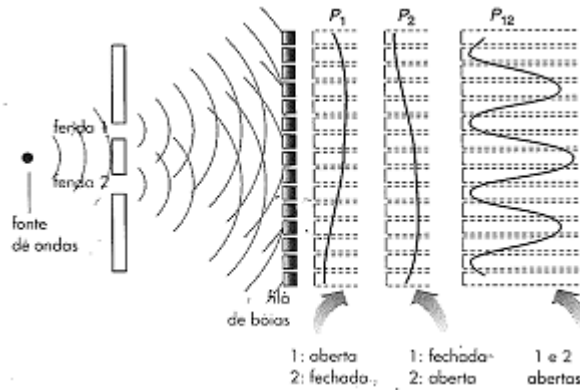
Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*:

A experiência da fenda dupla para ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*. Estas ondas podem ser geradas, por exemplo, por um bastão que toca na água em intervalos de tempo iguais. As caixas do experimento anterior podem ser substituídas por boias (rolhas de cortiça) que sobem e descem ao ritmo da passagem das ondas detectando, desta forma, a intensidade da onda. A intensidade da onda, ou a energia transferida pela onda, é proporcional à altura alcançada pela respectiva boia.

Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1. Isto é, P_1 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 e que incidem no detector (boias).
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 2. Isto é, P_2 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1 ou pela fenda 2. Isto é, P_{12} descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 ou pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).

Fig. 2 – Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água.



Fonte: Klein (1996, p.21)

É evidente que o perfil obtido no caso das duas fendas abertas é muito diferente do perfil obtido na experiência das esferas, onde $P_{12} = P_1 + P_2$. Na experiência com ondas aparece aquilo a que se chama de interferências e a curva obtida é denominada padrão de interferência. Esta curva não apresenta uma relação simples com as anteriores, não é simplesmente uma soma das curvas anteriores como no caso das esferas.

Nesta experiência, com ondas, verificamos que no padrão de interferência existem vários pontos onde a intensidade é nula, ou seja, vários pontos onde as boias permaneceram praticamente imóveis, resultado da sobreposição das ondas que vêm da fenda 1 e das que vêm da fenda 2 sempre em oposição de fase, isto é, resultado de uma interferência destrutiva. Verificamos, também, que há outros pontos onde a intensidade é máxima e a amplitude da onda resultante é o dobro das ondas incidentes nestes pontos, resultado da interferência construtiva entre ondas que nestes pontos então em concordância de fase. Entre estes pontos a intensidade apresenta valores diferentes.

Destes dois experimentos pode-se concluir: se o arranjo experimental originar padrão de interferência, o fenômeno é ondulatório, caso contrário, é corpuscular.

Agora é proposto repetir estes experimentos e esta discussão numa escala microscópica.

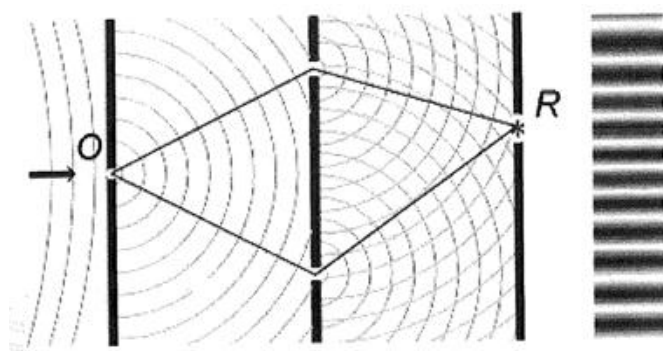
Fenda dupla com a luz

O experimento de interferência de luz foi feito por Thomas Young, em 1801. A fig. 3 ilustra como se propagam as ondas. Ao projetar a luz numa parede era observado regiões claras e regiões escuras, denominadas franjas de interferência. As regiões claras foi atribuído a interferências construtivas da luz e as escuras, a interferências destrutivas da luz. Desta forma Young inferiu, a partir das franjas, que a luz é uma onda.

Podemos transformar este experimento da física clássica em um experimento quântico diminuindo a intensidade da luz e usando um aparelho supersensível para detectar a luz (por exemplo, uma fotomultiplicadora).

Deste modo podemos ver as franjas de interferência se formando ponto a ponto na tela detectora. No caso da luz, dá-se o nome de “fóton” a cada um desses pontos observados. Estes pontos se agrupam em bandas acompanhando o padrão de intensidade típico da interferência.

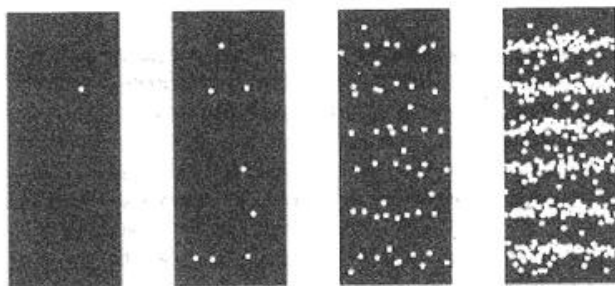
Fig. 3 – fenda dupla para a luz



Fonte: Pessoa (2006, p.3)

Por mais fraco que seja o feixe de luz, após um tempo suficiente o padrão de interferência se forma.

Fig. 4 – fenda dupla para a luz em regime quântico.



Fonte: Pessoa (2006, p.3)

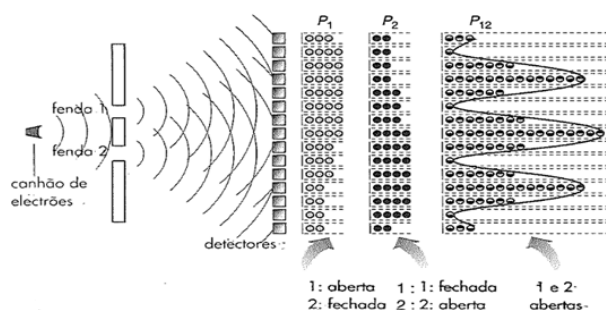
No regime quântico se observa a formação paulatina do padrão de interferência, resultado das ionizações, que ocorre uma a uma, na placa detectora.

O padrão de interferência obtido é o esperado, mas a transferência de energia durante a detecção, de maneira localizada, contraria a intuição macroscópica.

Fenda dupla com elétrons

Refazendo a experiência das duas fendas, agora com elétrons. Um canhão de elétrons dispara elétrons de mesma energia sobre a placa de duas fendas. A placa detectora localiza-se atrás da placa de duas fendas. Nessa experiência **não se sabe por qual fenda passam os elétrons** que serão representados, aqui, metade brancos, metade pretos. O resultado obtido é diferente do resultado obtido na experiência com esferas, aparecendo na tela detectora o padrão de interferências, marca do comportamento ondulatório.

Fig. 5 – fenda dupla para elétrons

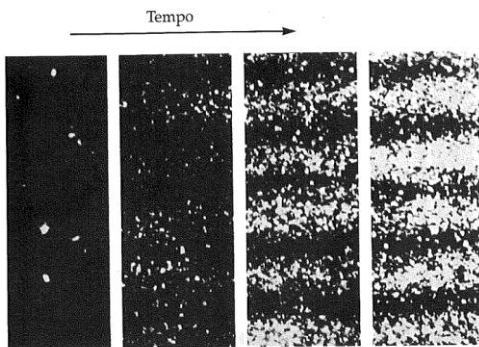


Fonte: Klein (1996, p.22)

Regulando a intensidade do canhão de elétrons, de modo que eles saiam um a um, ficando, portanto, a emissão e a detecção (impacto com a tela) de cada um deles isolados dos

outros, cada elétron é captado num ponto preciso do detector (localizado), contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são corpusculares. No entanto, à medida que se acumulam os impactos dos elétrons, ocorre a formação, ponto a ponto, do padrão de interferência semelhante ao obtido, anteriormente, quando os elétrons tinham sido emitidos em grande número, contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são ondas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons em regime quântico



Fonte: Klein (1996, p.23)

Destes resultados pode-se “concluir”, como se um objeto pudesse não ser nem uma coisa, nem o contrário dessa coisa:

- Os elétrons não são simplesmente corpúsculos, porque criam interferências quando chegam em número elevado;
- Os elétrons não são puramente ondas, porque são individualmente detectados (localizados).

Nesta situação, onde os elétrons são emitidos um a um, temos, portanto fenômenos independentes uns dos outros. Se os elétrons fossem corpúsculos, deveriam, forçosamente, passar por uma das fendas, e o fato da outra fenda estar aberta ou fechada não deveria ter qualquer influência sobre o seu comportamento. No entanto, a experiência mostra que os estados, aberto ou fechado, das fendas condicionam a distribuição espacial dos elétrons na tela detecedora como se o fato de uma segunda fenda aberta, oferecendo uma possibilidade de passagem suplementar ao elétron, impedisse-o de chegar a determinados pontos, caracterizados pelas franjas escuras (interferência destrutiva). Isto é, as propriedades atribuídas a uma partícula dependem das características do dispositivo para o qual ela se encaminha. Salienta-se, ainda, que nesta situação não se pode determinar por qual, das fendas um determinado elétron passará.

Fenda dupla com elétrons com fenda determinada

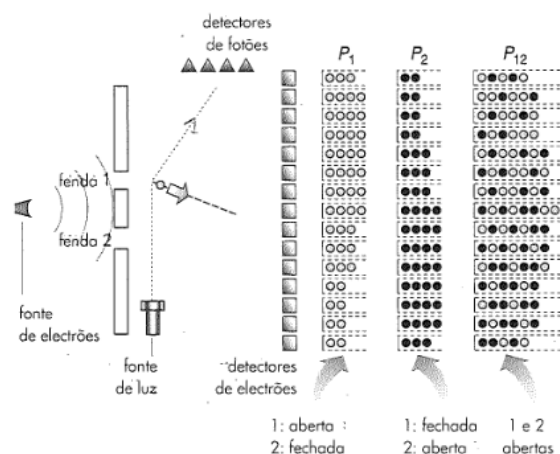
Propõe-se, então, outra situação com a experiência anterior da fenda dupla com elétrons, agora determinando por qual das fendas cada elétron passará. Esta determinação poderá ser feita através de uma fonte luminosa colocada entre a placa que contém as fendas e a tela detectora, iluminando os elétrons que passam, por exemplo, pela fenda 1. Desta forma, detectando a luz proveniente da fenda 1, fica determinado a fenda por qual determinado elétron passou. Do mesmo modo podemos determinar os elétrons que passam pela fenda 2.

O experimento poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 1.
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 2.
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora com as duas fendas abertas.

Notamos que a distribuição dos elétrons com uma das fendas fechada são simétricas entre si e quando as duas fendas estão abertas não se observa o padrão de interferência, isto é, encontramos um comportamento semelhante ao das esferas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons com fenda determinada



Fonte: Klein (1996, p.26)

Desta sequência, verifica-se quando a fenda pela qual passa cada elétron é determinada, o padrão de interferência não é mais observado, portanto, não é permitido supor que se possa, simultaneamente, observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada elé-

tron. Tais resultados são universais e são válidos para todas as partículas, sejam elas de luz (fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...). Ao determinar a fenda pela qual passam os elétrons a figura de interferência é perturbada.

Toda medição aparece pois como uma interação entre o objeto microscópico sobre o qual efectuamos a medição e o aparelho de medição propriamente dito, que é macroscópico. Existe pois entre os dois uma espécie de ligação indestrutível, uma união mínima, que nunca é nula. Esta relação obrigatória impede de levar em conta o que pertence ao próprio objecto medido e o que pertence ao próprio aparelho de medição. As propriedades das partículas já não parecem poder ser separadas das condições de sua manifestação (KLEIN, 1996, p.28).

Podemos concluir, após esta sequência de experimentos, que um determinado aparelho de medição pode tornar evidente uma grandeza específica, mas não outra. Se colocarmos uma questão de natureza ondulatória (difração) em relação a uma partícula, sua resposta será de natureza ondulatória (interferência). Se colocarmos uma questão de natureza corpuscular (detecção pontual) a sua resposta será de natureza corpuscular (impacto localizado). A natureza dos aparelhos utilizados determina o tipo de fenômenos observados. Nenhuma experiência nos mostra uma partícula se comportando simultaneamente como uma onda e como um corpúsculo, no entanto necessitamos destas duas imagens para traduzir os resultados experimentais.

A noção de trajetória também fica abalada após estas experiências, pois observando as interferências, não podemos precisar qual foi o percurso das partículas, nem mesmo a fenda por qual elas passaram. Isto é, mesmo conhecendo as condições iniciais não é possível determinar o movimento ulterior como na física clássica. O que podemos calcular é a probabilidade de que a partícula se manifeste neste ou naquele ponto da tela detectora.

Na experiência da fenda dupla com elétrons, ao acompanhar a formação do padrão de interferência em telas fosforescentes, observamos os pontos aparecendo um após o outro, isto é, observamos cada fóton sendo detectado de maneira localizada, uma característica corpuscular. No entanto, estes pontos se agrupam em bandas destacando o padrão típico da interferência, característica ondulatória.

Desta forma temos um objeto quântico exibindo propriedades contraditórias, caracterizando a contradição lógica entre onda e partícula já comentada anteriormente.

A versão fraca da dualidade onda-partícula afirma que: “Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de interferência), mas a detecção sempre se dá através de uma troca pontual de um pacote mínimo de energia”.

Note que nessa versão não é afirmado que os fótons ou os elétrons são sempre indivisíveis em sua propagação, mas que apenas na sua detecção eles aparecem de maneira indivisível e pontual e, também, não é afirmado que um objeto quântico sempre se comporta como uma onda, mas sim que ele pode exibir interferência.

Como é possível um objeto quântico apresentar ambas as características, ondulatória e corpuscular, num mesmo experimento?

Veremos agora como cada uma das quatro principais interpretações da Teoria Quântica responde a esta questão. Embora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica seja não realista, existem interpretações realistas. As mais usadas são:

Interpretações realistas:

1) **Interpretação Ondulatória:** Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula. Isto é, durante certo tempo temos uma onda espalhada, e depois temos uma partícula, sem que ambos coexistam simultaneamente, eliminando, assim, a possível contradição lógica.

2) **Interpretação Corpuscular:** O fóton e o elétron são na realidade uma partícula, o que é manifestado na respectiva detecção. Não existe onda associada e o padrão de interferência é explicado a partir da interação da partícula com o anteparo que contém as duas fendas, desta forma não há contradição.

3) **Interpretação Dualista Realista:** O objeto quântico se divide em duas partes, uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma determinada direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. Aqui a contradição é eliminada, pois o objeto quântico se divide em duas partes, uma sendo só partícula, e a outra só onda.

Nas interpretações acima se afirma algo sobre a natureza do ente físico em questão, no caso elétrons ou fótons. Esta natureza manifesta-se na experiência, mas independe dela.

Existe uma distinção clara entre o objeto de estudo e o experimento. Notem que o postulado quântico não desenvolve um papel importante nestas interpretações.

Vejamos agora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, a interpretação positivista de Bohr, também conhecida como interpretação da complementaridade:

Interpretação da Complementaridade: O fenômeno em questão é ondulatório, e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória passada do quantum detectado. O aspecto corpuscular observado na detecção se deve ao postulado quântico, de Max Planck, o qual afirma que existe uma descontinuidade essencial em qualquer processo atômico, como por exemplo, na ionização de átomos de prata na chapa fotográfica devido à ação da luz.

Notem que nesta interpretação nada se afirma sobre a realidade do ente físico que está sendo observado. Apenas afirma-se que o fenômeno é ondulatório. O fenômeno inclui o aparato de medida e o objeto que está sendo medido. O que é real aqui? O real é o fenômeno. Nada se afirma sobre a realidade do objeto que está sendo medido. Dentro desta perspectiva a física descreve fenômenos e não a realidade intrínseca de algum ente físico. Por isto esta interpretação é não realista. Para você, o que é real?

Agora vamos estudar a dualidade através de outro experimento, que envolve, também, o fenômeno da interferência.

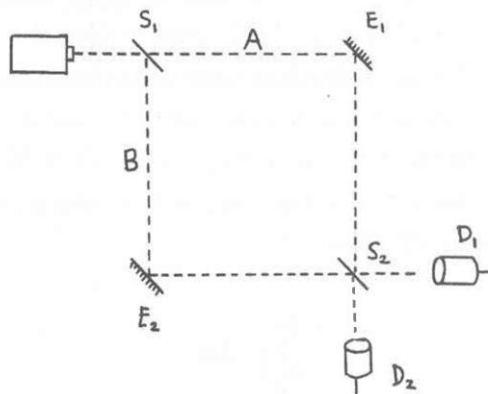
INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER CLÁSSICO

A intenção agora é dar continuidade à discussão da dualidade onda-partícula, através do problema conceitual do caminho percorrido pelo fóton na interferência quântica e destacar o enunciado da versão forte para a dualidade.

O interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) é um arranjo experimental relativamente simples de espelhos e semi-espelhos que demonstra o fenômeno da interferência da luz pela divisão de um feixe luminoso, parecido com o experimento da fenda dupla, porém mais simples, idealizado independentemente por Ludwig Zehnder e Ludwig Mach.

O feixe luminoso, considerado como consistindo de ondas em uma dimensão, monocromática de comprimento de onda λ , é dividido em um primeiro semi-espelho e então re-combinado em um segundo semi-espelho onde, dependendo da fase relativa adquirida pelos feixes ao longo dos caminhos, exibirá interferência construtiva.

Fig. 1 – Desenho do IMZ



Fonte: Pessoa (2006, p. 19)

Sob condições idealizadas, os espelhos, E1 e E2, são considerados perfeitamente refletores e os semi-espelhos, S1 e S2, refletem e transmitem exatamente 50% da luz neles incidente. Deste modo, se a amplitude do feixe inicial é Ψ_0 a amplitude do feixe transmitido e do feixe refletido será $\Psi_0/\sqrt{2}$. Cada reflexão da luz em um espelho ou semi-espelho introduz uma diferença de fase correspondente a $\lambda/4$, provocando um avanço de $1/4$ de comprimento de onda em relação à onda transmitida.

Desta forma o feixe A se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$. O espelho semi-refletor S2 divide o feixe A em duas partes iguais, a parte refletida sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$ chegando no detector D1

com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ e com amplitude de $\Psi_0/2$. A outra parte do feixe A, transmitida pelo espelho semi-refletor S2, chega no detector D2 com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$ devido à reflexão no espelho E1 e com amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumido: AD1 $\lambda/2$ e AD2 $\lambda/4$.**

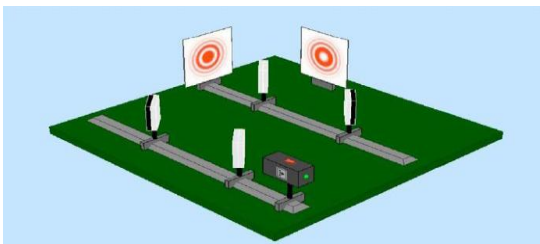
O feixe B também se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ devido às reflexões no espelho semi-refletor S1 e no espelho E2. O feixe B ao incidir sobre o espelho semi-refletor S2 é dividido em duas partes: A parte transmitida ao detector D1 mantém o deslocamento de fase de $\lambda/2$ e amplitude de $\Psi_0/2$, a parte refletida ao detector D2 sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$, resultando, portanto, num deslocamento de fase relativo de $3\lambda/4$ e amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumido: BD1 $\lambda/2$ e BD2 $3\lambda/4$.**

Assim é possível concluir que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D1 não têm diferença de fase entre si, resultando, portanto, numa interferência construtiva com amplitude Ψ_0 , correspondendo a 100% do feixe original. Conclui-se, também, que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D2 apresentam a seguinte diferença de fase, $3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2$, resultado numa interferência destrutiva, correspondendo à 0% do feixe original.

Podemos, também, concluir que só é possível superpor construtivamente dois componentes de onda se ao mesmo tempo outros dois componentes estejam se superpondo destrutivamente.

Se substituirmos os detectores por telas e considerarmos a pequena abertura angular característica da fonte, o feixe emitido não será mais paralelo. Assim, poderemos ter interferências pela defasagem ocasionada tanto pela diferença de caminho ótico como pelas reflexões sucessivas nos espelhos e semi-espelhos. Dessa forma, observaremos, em ambas as telas, a formação de anéis luminosos típicos do fenômeno de interferência. Os pontos localizados na região central dos anteparos estão de acordo com a previsão feita na situação idealizada discutida anteriormente.

Fig. 2 – IMZ em regime clássico.



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER QUÂNTICO (Interferometria para Um Fóton)

A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

Para transformar o experimento clássico anteriormente descrito num experimento quântico devemos inicialmente ajustar a fonte luminosa diminuindo a intensidade do feixe original até que poucos fótons incidam em S1, isto é, ajustar a fonte de modo que ela passe a emitir um fóton de cada vez, por exemplo, um fóton por segundo (regime monofotônico). Outra providência necessária é a utilização de detectores de fótons, supostamente ideais, sensíveis à presença de um único fóton (fotomultiplicadora).

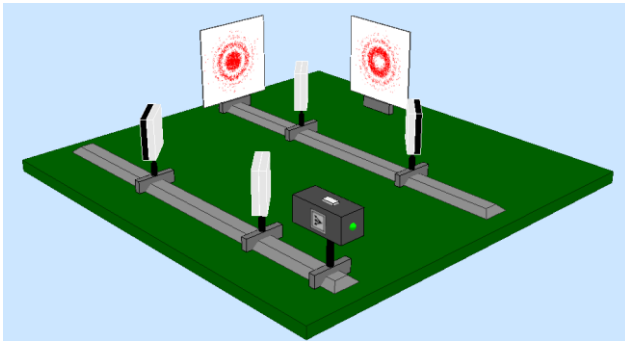
Deste modo o interferômetro estará funcionando em regime quântico, isto é, num regime de baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer.

Num primeiro momento, considerando apenas os fótons que incidem na região central dos detectores D1 e D2, poderíamos esperar que em cada um dos detectores fossem coletados 50% dos fótons emitidos pela fonte, isto é, 50% em D1 e 50% em D2. No entanto, não é isto que acontece. Todos os fótons, 100%, são detectados em D1, e nenhum em D2. Portanto, podemos afirmar que o interferômetro de Mach-Zehnder para fótons únicos tem o mesmo comportamento que o caso clássico, apresentando um padrão tipicamente ondulatório, interferência construtiva no detector D1 e interferência destrutiva no detector D2. Deste modo podemos concluir que, em certo sentido, cada fóton interfere consigo mesmo.

Considerando todos os fótons emitidos pela fonte, inclusive aqueles que rumam em direção a uma região bastante afastada do centro dos detectores e colocando anteparos no lugar dos detectores, observarmos uma distribuição de fótons aparentemente aleatória em cada tela. No entanto, com o passar do tempo, observaremos um padrão de anéis de interferência se formando em cada uma das telas, o qual nos mostra que existem regiões na tela que são inacessíveis aos fótons e regiões nas quais sua incidência é mais provável.

Este fenômeno é ondulatório, pois só podemos descrever o fato de que nenhum fóton foi detectado em D2 através de um modelo ondulatório, isto é, através de interferências destrutivas a partir de S2, ou ainda, porque não podemos inferir qual o caminho seguido pelo fóton dentro do interferômetro.

Fig.3 - IMZ em regime quântico



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Não há informação de qual caminho, então há interferência e o fenômeno é ondulatório.

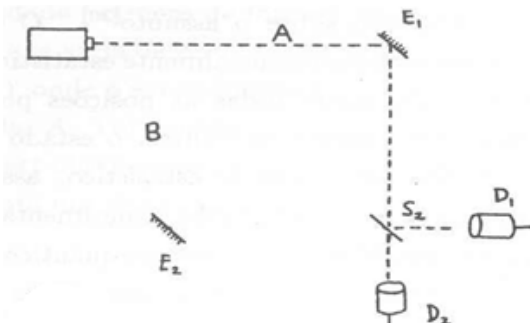
Determinando a trajetória seguida pelo fóton- Por qual caminho rumou o fóton?

Colocamos, agora, a seguinte questão: No experimento do interferômetro de Mach-Zehnder em regime quântico, depois que o fóton passou pelo semi-espelho S1, mas antes de chegar ao semi-espelho S2, em qual caminho, A ou B, ele se encontra?

Para essa discussão vamos seguir o seguinte roteiro:

- Retirar o espelho semi-refletor S1. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho A e não está no caminho B e após passar pelo espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

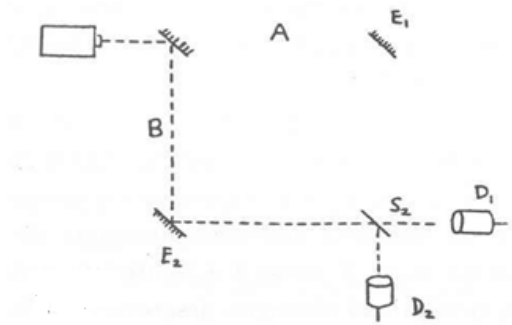
Fig. 4 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho A



Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

- Substituir o espelho semi-refletor S1 por um espelho de reflexão total. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho B e não está no caminho A e após passar pelo espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

Fig. 5 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho B



Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

Se com o fóton no caminho A a probabilidade de ser detectado em D2 é 50%, e com o fóton no caminho B a probabilidade de ser detectado em D2 também é 50%, pela definição do conectivo “ou” a probabilidade do fóton estar “ou em A ou em B” tem que ser 50%. Porém o experimento, em regime quântico, do interferômetro de Mach-Zehnder nega a afirmação de que o fóton está “ou em A ou em B”, visto que no experimento citado a probabilidade do fóton ser detectado pelo detector D2 não é 50%, mas é 0%. Logo é falsa a afirmação de que o fóton está ou em A ou em B.

Assim, parece que podemos concluir que os fótons não seguem trajetórias bem definidas. Tal conclusão não era esperada quando pensamos a luz sendo detectada na forma de partículas (fótons) e que tais partículas existem durante a propagação da luz, seguindo trajetórias bem definidas, embora, desconhecidas. Temos aqui um impasse!

Como podemos, então, interpretar o fenômeno de interferência quântica demonstrado nos experimentos anteriores?

A interpretação da complementaridade considera que o arranjo experimental determina o comportamento do fóton. Se, em princípio, for possível determinar o caminho percorrido pelo fóton, então o fenômeno é corpuscular e o fóton uma partícula. Se, por outro lado, o experimento apresenta aspectos ondulatórios tal como um padrão de interferência, o

fóton é considerado como sendo uma onda, e *não tem sentido* perguntar onde está o fóton. Em outras palavras, o sistema apresenta aspectos corpusculares ou ondulatórios, dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

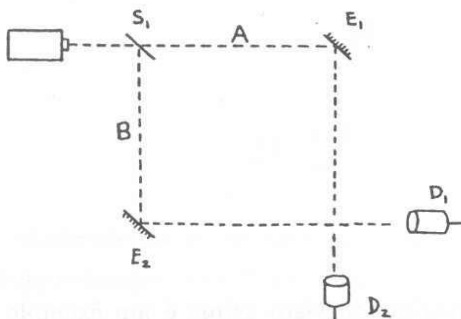
Fenômeno corpuscular

É importante destacar que para Bohr a palavra fenômeno designa a “totalidade” que inclui o objeto quântico e aparelhagem experimental e que ele só se completa quando o resultado experimental é registrado em nível macroscópico, isto é, quando o experimento termina.

Destacamos, ainda, que um determinado fenômeno é corpuscular, não porque o é detectado pontualmente como uma quantidade bem localizada de energia, visto que isto é comum também aos fenômenos ondulatórios, mas por ter uma trajetória bem determinada associada.

Podemos observar um fenômeno corpuscular com o interferômetro de Mach-Zehnder retirando o espelho semi-refletor S2.

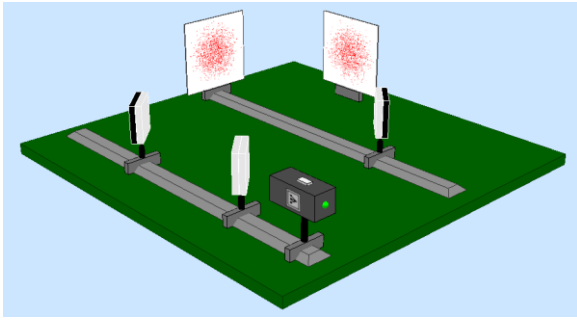
Fig. 6 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

Nessa situação, se o fóton é detectado pelo detector D1, podemos inferir que o fóton percorreu o caminho B; se for detectado em D2, a trajetória inferida é A. Isto é, o fenômeno apresenta trajetória determinada, portanto, é **corpuscular**.

Fig. 7 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Há informação de qual caminho, então o fenômeno é corpuscular e não há interferência.

Para a interpretação da complementaridade, uma vez completada a medição, o fenômeno é corpuscular. O fóton é considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Esta inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é conhecida como “retrodição”.

Dualidade onda-partícula: versão forte

Agora podemos enunciar a versão que Bohr deu para a dualidade onda-partícula, que é chamada de “versão forte”:

Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

Esta versão expressa a noção de que onda e partícula são aspectos mutuamente exclusivos, mas *complementares*, da natureza. Isto é, na representação de um objeto quântico como um elétron ou um fóton, podemos considerá-lo ou como uma partícula, para certas situações experimentais, ou como onda, para outras situações.

Segundo Bohr, é impossível montar uma situação experimental que exhiba simultaneamente esses dois aspectos da natureza (por isso é que são *mutuamente exclusivos*). Porém, só podemos compreender um objeto quântico de maneira completa quando levamos em conta esses dois aspectos complementares. Isto é, não conseguimos representar um objeto quântico em um “quadro único”: precisamos de descrições complementares. Isto se deve ao fato de estarmos usando uma linguagem clássica para descrever um fenômeno quântico.

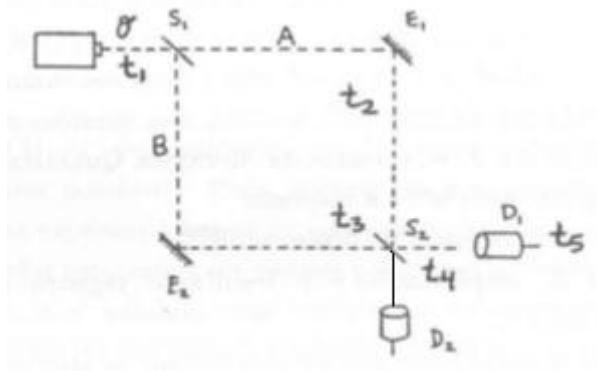
Experimento de escolha demorada

Como vimos anteriormente a presença ou não do espelho semi-refletor S_2 no interferômetro de Mach-Zehnder é determinante para se obter um fenômeno ondulatório ou corpuscular respectivamente.

O experimento de escolha demorada usando o IMZ foi estudado pelo físico norte-americano John Wheeler, a partir de 1978, buscando responder a questão sobre a possibilidade de colocar ou retirar o espelho semi-refletor S_2 enquanto o fóton estiver percorrendo o interferômetro, ou seja, até que instante o cientista pode escolher entre deixar ou retirar S_2 , de forma a fazer o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

Vamos agora então examinar algumas consequências deste *experimento de escolha demorada* para as diferentes interpretações que já conhecemos. Para tanto, consideremos alguns instantes temporais ao longo do percurso do fóton, na montagem da Fig. 8. No instante t_1 , o fóton incide em S_1 ; em t_2 , ele se encontra dentro do interferômetro; em t_3 ele passa pela posição do espelho semi-refletor S_2 ; em t_4 ele se aproxima do detector; em t_5 ele gera um sinal macroscópico no osciloscópio.

Fig. 8 - Fig. Desenho do interferômetro no qual estão indicados diferentes instantes temporais.



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

De acordo com a interpretação da complementaridade não podemos afirmar nada sobre o fóton no instante t_2 , quando o fóton já está dentro do interferômetro. Não se pode dizer que o objeto quântico é onda, nem que ele é partícula. Isto só poderá ser feito quando o “fenômeno” se completa, e um registro macroscópico for obtido no aparelho de medição, no instante t_5 . Isto é, somente no instante t_5 , após o registro macroscópico obtido pelo aparelho de medida, é que poderemos dizer o que estava acontecendo no instante t_2 , o que estava acontecendo no passado.

Devemos chamar atenção para o fato de que mesmo que o semi-espelho não esteja presente no instante t_3 , o fenômeno em t_4 ainda não se constitui como corpuscular, visto que ainda há possibilidade do semi-espelho ser colocado, antes do registro macroscópico, de forma a recombina os componentes, resultando em um fenômeno ondulatório. Só com registro macroscópico é que esta possibilidade pode ser excluída.

Segundo a interpretação da complementaridade é proibido que se fale algo sobre o fenômeno no instante t_2 e é possível acontecer de o passado se atualizar no presente. Isto, porém, não ocorre com as interpretações realistas. De acordo com a interpretação ondulatória, em t_2 o pacote de onda se divide em duas posições (no caminho A e no B); o que ocorre no futuro (em t_3) em nada afeta a realidade em t_2 . O mesmo ocorre com a interpretação da dupla solução.

O princípio da complementaridade e a linguagem clássica.

O ser humano desenvolveu seu aparelho cognitivo para se adaptar aos corpos “macroscópicos”, ou seja, aos corpos que nos rodeiam e que percebemos. Concomitantemente, desenvolveu uma linguagem que permite a ele se comunicar com os outros e lhes informar do estado de coisas do mundo. Esta foi chamada de “linguagem clássica”, pois é a linguagem própria da Física Clássica. No entanto, nada garante que as entidades microscópicas tenham o mesmo comportamento das clássicas, podendo ser classificadas como ondas ou partículas. De fato, não temos razões para acreditar que nossa linguagem e mente clássica, que classificam os objetos como ondas ou partículas, possam capturar adequadamente todos os aspectos das entidades microscópicas. O que podemos fazer, segundo Bohr, é ora utilizar uma representação corpuscular para descrever um experimento (fenômeno), ora utilizar um quadro ondulatório para descrever outro experimento. Cada experimento envolvendo entidades microscópicas pode ser compreendido ou num quadro corpuscular (quando elas exibem trajetórias bem definidas), ou num ondulatório (quando elas manifestam padrões de interferência), nunca ambos ao mesmo tempo. Notem que o resultado do experimento sempre é uma grandeza microscópica, sendo entendida dentro do ambiente da linguagem clássica. Assim, o princípio da complementaridade surge como uma tentativa de se interpretar o resultado de um experimento de forma objetiva, usando a linguagem clássica. Para tanto precisamos abrir mão do realismo. Não temos mais acesso ao objeto em si. Apenas descrevemos um fenômeno e o fenômeno envolve o objeto e o aparato de medida. Não faz

sentido mais afirmar algo sobre a natureza de algum objeto antes deste ser medido.

APENDICE D**QUESTÕES UTILIZADAS NO TESTE DE AVALIAÇÃO DA APREENDIZAGEM.**

1) Quando uma teoria não consegue explicar um determinado fenômeno observado, o que devemos fazer?

- a) Abandonar a teoria.
- b) Tentar ajustar a teoria.
- c) Utilizar outra teoria e abandonar a anterior.
- d) Utilizar outra teoria e não abandonar, necessariamente, a anterior.

2) Considerando a metáfora da árvore discutida em sala de aula, qual a sua opinião?

a) Realista, emiti o mesmo som que sempre emitiiu, haja alguém para ouvir ou não.

b) Antirrealista, somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência.

c) Instrumentalista, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante é se o modelo utilizado para descrever sua queda funciona ou não.

d) Empirista, a pergunta não faz sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento.

3) Um dos assuntos trabalhado em sala de aula foi a interação radiação eletromagnética com a matéria através do efeito fotoelétrico, onde vimos que a luz quando incide sobre determinados matérias poderá arrancar elétrons deste material. Vimos que a Física Clássica não era capaz de explicar a totalidade do fenômeno. A teoria que é capaz de explicar este efeito:

- a) Considera esse fenômeno ondulatório.
 - b) Considera esse fenômeno corpuscular.
 - c) Considera esse fenômeno ondulatório e corpuscular.
- 4) Para explicar o efeito fotoelétrico é necessário considerar a interação da luz com a matéria, como uma interação do tipo:
- a) Partícula-partícula.
 - b) Onda-onda
 - c) Partícula-onda
 - d) Onda-partícula
- 5) A constante de Planck determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada. A ordem de grandeza dessa constante:
- a) Faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico.
 - b) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos porque é um número muito grande.
 - c) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico porque é um número muito pequeno.
- 6) Quando um fenômeno (objeto+arranjo experimental) registra um padrão de interferência, podemos afirmar:
- a) O fenômeno é corpuscular.
 - b) O fenômeno é ondulatório.
 - c) O fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular.
 - d) O fenômeno não é ondulatório e nem corpuscular.
- 7) No experimento da fenda dupla com esferas não houve o registro do padrão de interferência. No experimento da fenda dupla com ondas produzidas na superfície na água numa cuba, bem como, no experimento com elétrons, houve o registro do padrão de interfe-

rência. No entanto, quando era localizada a fenda pela qual o elétron passava através de uma iluminação adequada, o padrão de interferência não era mais registrado. Sobre o experimento da fenda dupla com elétrons, podemos afirmar:

- a) Trata-se de um fenômeno exclusivamente corpuscular, pois o elétron é uma partícula.
- b) Trata-se de um fenômeno exclusivamente ondulatório, pois o elétron é uma onda.
- c) Trata-se de um fenômeno ondulatório e o fato de iluminar o elétron não altera sua natureza.
- d) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular, pois a natureza do elétron foi alterada.
- e) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular pois a natureza do experimento foi alterada.

8) No experimento do Interferômetro de Mach-Zenhder, tanto no regime clássico como no regime quântico, um dos detectores registrou uma contagem de 100% enquanto o outro, registrou 0%. Isto só pode ser explicado pelo fenômeno da interferência. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório.
- b) Corpuscular.
- c) Ondulatório e corpuscular.
- d) Ondulatório ou corpuscular.

9) Num experimento do Interferômetro de Mach-Zenhder, no regime quântico, o caminho pelo qual o fóton percorre foi determinado. Cada um dos detectores registrou uma contagem de 50%. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório.
- b) Corpuscular.

c) Ondulatório e corpuscular.

d) Ondulatório ou corpuscular.

10) De acordo com o postulado quântico, a interação entre a matéria e a radiação eletromagnética se dá pela troca de energia de maneira _____, com a matéria absorvendo _____, cuja energia é proporcional a _____ da radiação.

Assinale a alternativa correta que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) Contínua – quanta – amplitude.
- b) Discreta – prótons – frequência.
- c) Discreta – fótons – frequência.
- d) Contínua – elétrons – intensidade.
- e) Contínua – nêutrons – amplitude.

ANEXO A: ROTEIRO EXPLORATÓRIO PARA O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

1- Com o software aberto, localize o *menu* LANGUAGE e selecione o idioma.

2- Selecione a opção VER FEIXES e observe o caminho que é seguido pela luz no interferômetro.

Em seguida selecione novamente esta opção para desativar este comando.

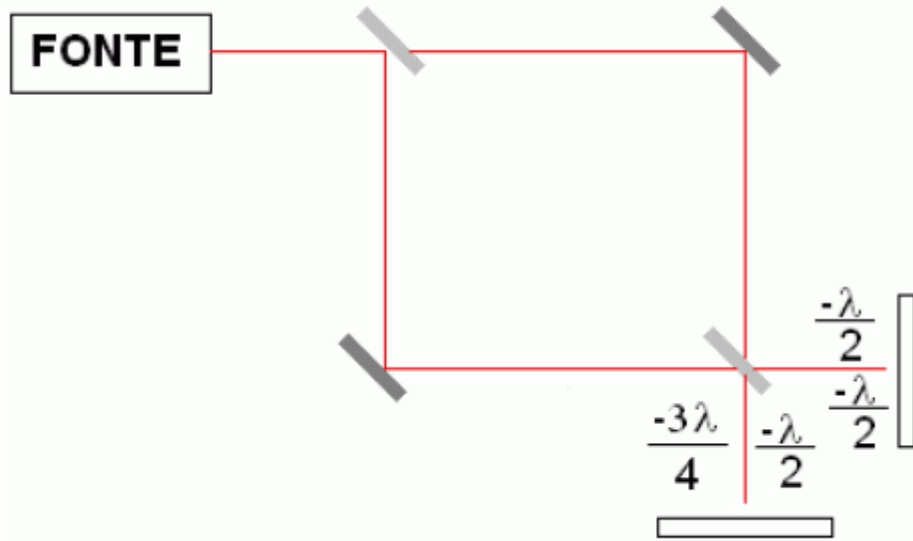
3- Vamos agora identificar as estruturas que compõem o interferômetro. Para isso basta você passar o *mouse* sobre cada uma delas. Localize a fonte, os espelhos, espelhos semi-refletores e os anteparos.

4- Selecione a opção LASER e em seguida LIGADO. Observe o que aparece na tela do interferômetro. Descreva o que você observa nos anteparos.

Formam-se figuras de interferência circulares nos dois anteparos. Observe que as figuras são complementares, isto é, onde há interferência construtiva em um anteparo, há interferência destrutiva na posição equivalente do outro anteparo. Pode-se dizer que onde há uma região escura no anteparo 1, forma-se uma região clara no anteparo 2 e vice-versa. A complementaridade dos padrões de interferência é resultado da conservação de energia – a intensidade total da luz que chega aos dois anteparos é igual a intensidade da luz emitida pela fonte, considerando que estamos supondo que não haja nenhuma dissipação do laser no trajeto até os anteparos e na interação com o material do anteparo.

5- Procure explicar a formação dos padrões de interferência observados. (**Dica:** uma reflexão em um espelho semi-refletor introduz um deslocamento de fase na luz correspondente a um quarto de comprimento de onda da mesma. Faça a soma dos deslocamentos de fase dos feixes que chegam a cada anteparo.)

Observe as frentes de onda provenientes dos dois caminhos no interferômetro chegam ao ponto central dos anteparos (esquema abaixo). Uma análise simples mostra que em um dos anteparos, as frentes de onda chegam com um atraso de $\lambda/2$ (meio comprimento de onda) em relação ao feixe emitido pela fonte. Ambos os feixes, no entanto, estão em fase entre si e na superposição, depois do segundo semi-espelho, resultam numa interferência construtiva. A mesma análise simples, mostra que no outro anteparo, as duas frentes de onda apresentam uma defasagem de $\lambda/4$ (um quarto do comprimento de onda) revelando, portanto, uma interferência destrutiva.



6- Retire do interferômetro o espelho semi-refletor 2 (opção ESPELHO SEMI-REFL. 2). Qual a relação entre as intensidades da luz nos anteparos e a intensidade da luz emitida pela fonte?

Considerando-se espelhos ideais em que não haja nenhuma perda da intensidade da luz, a intensidade nos anteparos é a mesma e corresponde a metade da intensidade da luz emitida pela fonte. Observe que quando falamos em intensidade da luz ou de onda em geral, falamos em uma grandeza diretamente proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

7- Recoloque o espelho semi-refletor 2 no interferômetro.

8- A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez. Selecione a opção FÓTONS ÚNICOS e observe os anteparos. (**Dica:** no *menu* FÓTONS/SEGUNDO, a simulação poderá ser acelerada se for colocado o valor 10, para que a emissão de fótons a cada segundo seja maior.)

9- Compare os padrões que vão se formando nos anteparos com os que foram observados quando o interferômetro foi utilizado com a opção LASER. Como é feita a detecção dos fótons nos anteparos? Após a detecção de um grande número de fótons, como podemos descrever a distribuição dessas detecções nos anteparos? (**Dica:** para responder a esta última pergunta, observe no canto superior direito da tela a contagem de fótons.)

A detecção dos fótons é puntual - representada na forma de pontos - os quais atingem os anteparos em determinadas regiões. A distribuição das detecções é aleatória (ora em um, ora em outro anteparo), mas segue uma distribuição em torno de 50% para cada anteparo.

Conforme o número de detecções aumenta, é possível observar o aparecimento de um padrão de interferência igual ao obtido com a fonte laser.

10- Coloque um detector num dos braços do interferômetro (opção DETECTOR 1). Observe novamente a contagem de fótons, nos anteparos e no detector. O que você observa? (**Dica:** clique no botão ACELERAR.)

Cerca de 50% dos fótons são detectados no detector 1 e os 50% restantes se dividem quase que igualmente entre os anteparos. Com o uso de detectores, os fótons têm o atributo posição definido, isto é, podemos dizer por qual braço do interferômetro o fóton seguiu e o fóton apresenta um comportamento corpuscular. Os anteparos não exibem mais um padrão de interferência.

11- Observe agora os anteparos. O padrão de impactos revela interferência? Explique.

Não se observa interferência, pois quando se pode dizer o trajeto do fóton por meio de uma medida (no caso ao se usar um detector em um dos braços do interferômetro), o fóton se comporta como uma partícula. Esse é a problemática da dualidade onda-partícula na Física Quântica.

12- Coloque mais um detector no interferômetro (opção DETECTOR 2). O que se observa na contagem de fótons nos detectores e nas luzinhas dos detectores e da fonte? E na tela? Clique uma vez no botão ACELERAR. O que se observa nas contagens dos detectores?

Cerca de 50% dos fótons é absorvida em cada detector e, cada detecção é representada por uma luzinha sobre o detector. Estas luzinhas nunca acendem simultaneamente. Não se observa figura de interferência nos detectores, visto que os fótons são absorvidos. Acelerando-se as emissões verifica-se que a distribuição das detecções continua em cerca de 50% para cada detector.

13- Considerando apenas um fóton sendo emitido na fonte, descreva como se comporta um espelho semi-refletor. Obs.: um espelho semi-refletor (separador de feixe) divide um feixe luminoso em dois feixes de igual intensidade.

Tudo depende do arranjo experimental que o fóton encontra. No caso descrito acima, em que há um detector em um dos braços ou um detector em cada um dos braços do interferômetro, a trajetória do fóton fica bem definida e o fóton se comportará como partícula. Assim, o fóton será refletido ou transmitido com a mesma probabilidade, seguindo por um dos caminhos do detector.

14- Se um fóton atravessa o aparelho de cada vez, como você descreve a formação do padrão de interferência observado na tela? (**Dica:** o padrão não foi formado pela interferência entre diferentes fótons, pois, a cada instante apenas um fóton atravessa o interferômetro e chega aos anteparos).

Primeiramente, observe que para haver um padrão de interferência, não há detectores nos braços do interferômetro. Isso significa que, ao mandarmos um único fóton de cada vez para o interferômetro, não podemos dizer com certeza, qual o caminho que o fóton seguiu. Tudo se passa como se o fóton seguisse pelos dois braços ao mesmo tempo. Como o fóton não se divide, abrimos mão de conceber o fóton como uma partícula e pensamos no fóton como uma onda. A onda então, se divide em duas frentes de onda e cada uma segue por um braço. As ondas se reencontram, então, após o segundo espelho semi-refletor e podem exibir as interferência destrutiva ou construtiva que determinam as probabilidades de detecção do fóton em cada posição do anteparo.

15- Vamos agora testar a atuação dos filtros polaroides. Clique na janela FILTRO POLAROIDE 1 e selecione a opção FÓTONS ÚNICOS. Que padrão é observado nos anteparos?

Observa-se o mesmo padrão de interferência obtido com luz laser ou com os fótons únicos. Nesse simulador, a fonte operando no modo LASER emite luz linearmente polarizada. Você poderá usar dois polarizadores perpendiculares entre si para determinar a polarização da luz e conseqüentemente, a polarização do fóton.

16 Coloque, agora, o filtro polaroide 2 no interferômetro. Houve alguma alteração em relação ao que você observou antes?

A presença do polaroide 2 não afetou as figuras de interferência.

17- Mude a inclinação de um dos filtros polaroides, digitando um valor para o ângulo ou girando-o diretamente. Descreva os padrões de interferência observados. Houve alguma alteração em relação ao que foi observado nas questões 2 e 3? Tente explicar o que você observou.

Os fótons são absorvidos quando se altera a inclinação do filtro polaroide. Dessa forma, observa-se que quanto maior é o ângulo de inclinação do filtro polaroide, mais o padrão de interferência se distancia do padrão observado anteriormente. As figuras de interferência começam a ficar borradas.

18- A detecção de cada fóton nos anteparos ocorre de forma localizada, numa posição definida. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade

posição bem definida? Proponha uma maneira de descobrir isto usando uma combinação de filtros polaroides.

Sim, é possível descobrir por onde o fóton passou. Quando o filtro polaroide está em 90^0 as detecções não formam padrão de interferência. Se colocarmos um filtro polaroide perpendicular ao outro podemos saber por qual dos caminhos o fóton passou.

19- Vamos tentar descobrir por qual caminho passa o fóton usando dois filtros polaroides, um em cada braço do interferômetro, com uma inclinação relativa de 90^0 entre eles. Assim, se o fóton passar por apenas um dos braços, terá que sair do interferômetro, necessariamente, com sua polarização dada pelo eixo de polarização do filtro polaroide que se encontra naquele braço. Como você poderá descobrir qual o estado de polarização do fóton emergente?

Colocando-se os três filtros polaroides no interferômetro e inclinando todos eles em 90^0 , observa-se que todos os fótons são absorvidos. Quando os três filtros polaroides estão com inclinação 0^0 nenhum fóton é absorvido. Verifica-se, portanto, que o fóton tem polarização horizontal. Assim, se colocarmos o primeiro e o terceiro filtro polaroide com 90^0 de inclinação e o segundo com 0^0 , observamos que o fóton passou pelo caminho onde está o segundo filtro polaroide.

Também é possível orientar o segundo e terceiro filtro polaroide, deixando o primeiro com 0^0 , verifica-se que o fóton segue o caminho do primeiro filtro.

20- Selecione a orientação do filtro polaroide 1 para 0^0 ou 360^0 e posicione o filtro polaroide 3 de modo que fique com orientação paralela ao primeiro. O que se observa nos anteparos?

Se o filtro polaroide 2 também estiver em 0^0 ou em 360^0 , os fótons serão detectados nos anteparos, formando figuras de interferência. Caso o filtro polaroide 2 esteja com uma inclinação diferente de 0^0 ou 360^0 , observa-se que as figuras de interferência começam a desaparecer, vindo a ser representadas simplesmente por pontos que não revelam figuras de interferência nos anteparos.

21- O fóton tem ou não o atributo posição definido?

Sim, ele segue pelo caminho onde o filtro polaroide está com a mesma inclinação do filtro polaroide 3.

22- E então, por onde passou o fóton? (**Dica:** cruze os eixos dos polaroides.)

Se o filtro polaroide 1 está paralelo a filtro polaroide 3, o fóton segue o caminho 1. Caso o filtro polaroide 2 esteja paralelo ao filtro polaroide 3, o fóton irá seguir o caminho 2.

23-

a) O que o resultado obtido no experimento até agora significa para o nosso modelo mental do fóton como um objeto que possui o atributo posição dentro do interferômetro?

b) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo dentro do interferômetro?

c) E quando não se observa um padrão de interferência? Por quê? (Dica: se os fótons possuísem o atributo posição quando dentro do aparelho, então cada fóton só poderia interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho, certo?).

a) O fóton é uma partícula que “carrega” a informação posição.

b) Quando se observa o padrão de interferência, o fóton não tem o atributo posição no interferômetro, podendo ter passado por qualquer um dos caminhos.

c) Quando não se observa o padrão de interferência é possível descobrir o caminho seguido pelo fóton. A possibilidade de cada fóton só poder interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho não se sustenta. Para o fóton “saber” se ele está destinado a atingir a tela onde antes de termos cruzado os eixos dos polaroides havia um mínimo de interferência e não chegava luz, ele teria que dispor da informação sobre os eixos de polarização de ambos os polaroides e não apenas daquele pelo qual ele teria passado, de acordo com o modelo mental de partícula possuidora do atributo posição.

24- Coloque os detectores 1 e 2 no interferômetro. Verifique se os dois detectores registram simultaneamente a entrada de cada fóton individual no interferômetro. O que você observa?

O fóton segue o caminho 1 ou 2, visto que não ocorre detecção simultânea.

25- Com os dois detectores de fótons colocados no interferômetro, qual a probabilidade de detecção do fóton no detector 1? E no detector 2?

A probabilidade de detecção é de cerca de 50% em cada detector.

26- Considerando o item acima tente dar uma explicação em torno da dualidade onda-partícula para o que ocorre com o estado do fóton quando tentamos descobrir por qual dos braços ele passa.

Quando usamos polarizadores ou detectores de forma que o arranjo experimental permita saber qual o caminho seguido pelo fóton, então podemos inferir qual caminho o fóton seguiu. Nesse caso, dizemos que o fóton tem o atributo posição. Tendo o atributo posição, tudo acontece como se o fóton fosse uma partícula e como consequência, não verificamos nenhum padrão de interferência. Vale ressaltar que somente ondas exibem um padrão de interferência e ondas não têm o atributo posição definido.

