UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
CAMPUS DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA

Neide Maria Michellan Kiouranis

EXPERIMENTOS MENTAIS NO ENSINO DE CIÊNCIAS:
implementação de uma sequência didática

Bauru
2009

Neide Maria Michellan Kiouranis

EXPERIMENTOS MENTAIS NO ENSINO DE CIÊNCIAS:
implementação de sequência didática

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Área de Concentração em Ensino de Ciências, da Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência, sob a orientação do Prof. Dr. Aguinaldo Robinson de Souza e co-orientação do Prof. Dr. Ourides Santin Filho.

Bauru

2009

Kiouranis, Neide Maria Michellan.
Experimentos mentais no ensino de ciências: implementação de uma sequência didática / Neide Maria Michellan Kiouranis, 2009.
313 f. : il.

Orientador: Aguinaldo Robinson de Souza
Co-orientador: Ourides Santin Filho

Tese (Doutorado)–Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2009

1. Ensino de ciências. 2.Experimentos mentais . 3. Metodologia. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

NEIDE MARIA MICHELLAN KIOURANIS

EXPERIMENTOS MENTAIS NO ENSINO DE CIÊNCIAS:
implementação de uma sequência didática

Tese apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Bauru, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência, sob a orientação do Prof. Dr. Aguinaldo Robinson de Souza e co-orientação do Prof. Dr. Ourides Santin Filho.

Banca examinadora:

Presidente: Prof. Dr. Aguinaldo Robinson de Souza
Instituição: Universidade Estadual Paulista

Titular: Prof. Dr. Luiz Carlos de Menezes
Instituição: Universidade de São Paulo

Titular: Prof. Dr. Luiz Henrique Ferreira
Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Titular: Prof. Dr. João José Caluzi
Instituição: Universidade Estadual Paulista

Titular: Prof. Dr. Eduardo A. Terrazan
Instituição: Universidade Estadual Paulista

Bauru, 22 de junho de 2009.

Dedico esta tese

A meus queridos filhos Alexis e Petros,
a meu marido Yannis (*in memorian*) e
aos meus pais Pedro (*in memorian*) e Maria,
pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá e ao Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas, pela liberação integral de minhas atividades acadêmicas durante três anos e meio, e aos colegas da área, por terem me substituído no período de afastamento, garantindo, assim, o fluxo normal das atividades de ensino no Curso.

Aos alunos do Curso de Química, disciplina química quântica, do ano 2006, que contribuíram com a pesquisa.

Aos funcionários e professores da Faculdade de Ciências / Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências, da UNESP de Bauru, em especial ao profissionalismo e respeitosa acolhida de Ana Grijo Crivellari e Andressa Ferraz de Castro Talon.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de doutorado do Programa Institucional de Capacitação Docente e Técnica – PICDT durante dois anos.

Ao Professor João Zanetic, pelas primeiras conversas sobre experimentos mentais.

Aos professores João José Caluzi e Luiz Roberto Evangelista, pelas valiosas sugestões no Exame de Qualificação.

À minhas irmãs, pelo carinho, amor e por ter suportado e respeitado minhas constantes recolhidas.

Ao Aloísio, Ana, Eurica e Marcelo, eternos companheiros nesta jornada, e também não posso esquecer os que foram incansáveis no apoio e incentivo: Ângela, Cida, Eraldo, Elza, Inesa, Ivete, Mari, Rose, Rosana. Minha profunda gratidão.

Dentre as várias pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, quero reconhecer o apoio e incentivo dos amigos: André, Dirce, Deusa, Dulce, Fúlvia, Henrique, Junior, Luzia, Mariazinha, Regina e Silvana.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador Prof. Dr. Aguinaldo Robinson de Souza e co-orientador Prof. Dr. Ourides Santin Filho, mais que orientadores, seguramente, foram exemplos de sabedoria, de incentivo, de apoio e de respeito nesta maravilhosa aventura dos experimentos mentais, os quais influenciaram de modo significativo meus conhecimentos acerca do mundo físico.

Finalmente, minha profunda gratidão a todos que, de uma forma ou de outra, encorajaram-me na realização deste trabalho.

KIOURANIS, N. M. M. **Experimentos mentais no ensino de ciências**: implementação de uma sequência didática. 2009. 313f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência) – UNESP, Faculdade de Ciências, Bauru, 2009.

RESUMO

Esta pesquisa é fruto do desenvolvimento de uma sequência didática sobre o comportamento das entidades físicas: partícula, onda e partícula-onda no Experimento da Dupla Fenda, numa versão adaptada de Feynman e colaboradores e foi desenvolvida com estudantes de terceira série do ensino superior do curso de Química, disciplina Química Quântica, de uma universidade pública estadual. O objetivo geral do estudo foi discutir os fundamentos e práticas de experimentos mentais, tendo como parâmetro a utilização de diversas alternativas didáticas e seus desdobramentos para o ensino nas disciplinas científicas. A pesquisa de cunho qualitativo ancora-se nos fundamentos dos experimentos mentais e tem por base as teorias que visam promover a comunicação verbal e escrita dos conhecimentos científicos. O problema de pesquisa originou-se das dificuldades que os estudantes demonstravam em sala de aula para explicar e debater suas ideias, de maneira significativa, inteligível e dinâmica, quando estas exigiam deles o domínio da verbalização de conhecimentos científicos sobre o experimento da dupla fenda. Para interpretação e análise dos dados, utilizou-se a vertente interpretativa por meio de instrumentos e técnicas que permitem, principalmente, a descrição e interpretação de fatos e fenômenos, a recuperação de sentidos, tendo como base a investigação interpretativa do conjunto de materiais empíricos que se transformaram em textos. Os resultados revelam que os procedimentos didáticos utilizados são relevantes por possibilitarem a problematização, a discussão, o uso da imaginação e da linguagem verbal e escrita, pouco usuais em contextos de aulas de Química Quântica. Com relação aos textos, tanto aqueles transcritos das discussões e das falas dos estudantes quanto os

que foram produzidos durante o desenvolvimento da pesquisa, por solicitação do professor, merecem observação. São produções textuais consideravelmente reduzidas, fragmentadas, sem progressão e continuidade das ideias, sem sequência, não interligando as partes de modo a constituir um todo articulado. Pela Análise do Discurso, constatamos perda do fio de unidade que garante a sua interpretabilidade. Nos aspectos científicos, as propriedades de partículas e ondas se revelaram facilmente na discussão, contudo, as dificuldades na escrita foram bastante significativas. Dificuldades importantes também foram detectadas nas produções textuais desses estudantes ao lidarem com um sistema que simulou a propagação de elétrons através de uma ou de duas fendas.

Palavras-chave: Experimentos mentais; Experimento da dupla fenda; Ensino de Química Quântica.

KIOURANIS, N. M. M. **Mental experiments in the teaching of sciences**: implementation of a didactic sequence. 2009. 313f. Theses (PHD in Science Education) – UNESP, Faculty of Science, Bauru, 2009.

ABSTRACT

This research is the result of the development of a didactic sequence on the behavior of physical entities: particle, wave and wave-particle in the Double-Slit Experiment, in an adapted version from Feynman and assistants, which was developed with university students from the third grade of the Chemistry course, in the discipline of Quantum Chemistry, at a Brazilian public state university. The study aimed to discuss the fundaments and practices of thought experiments by using several didactic alternatives and its unfoldings to the teaching of scientific disciplines. The research, of qualitative basis, is anchored to the fundaments of thought experiments grounded on theories aiming to promote verbal and written communication of scientific knowledge. The research problem focuses on the difficulties that the students show in the classroom in order to explain and discuss their ideas when these require that they master verbalization of scientific knowledge on the double-slit experiment in a meaningful, significant and dynamic manner. For interpretation and analysis of data, the interpretive current was used through tools and techniques that allow mainly the description and interpretation of facts and phenomena, the recovery of meanings, based on interpretive investigation of the set of empirical materials that were turned into texts. Results revealed that the didactic procedures used are relevant since they allow problematization, discussion, the use of imagination and of verbal and written language, quite rare in classroom contexts of Quantum Chemistry. Regarding the texts, both the ones transcribed during the discussions and the students' speeches and those produced during the development of the research, required by the teacher, deserve attention. The text productions were

found considerably reduced, fragmented, lacking progression and continuity of ideas, and also lacking the interconnected sequence of the parts that constitute an articulated whole. By means of discourse analysis, we detected loss of the line of unity that assures its interpretability. As for the scientific aspects, the properties of particles and waves, these were easily revealed in the discussions, though the difficulties in writing were rather significant. Important difficulties were also observed in the text productions of these students while dealing with a system that simulated the propagation of electrons through one or two slits.

Keywords: Thought experiments; Double slit experiment; Quantum chemistry teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Classificação taxonômica	59
Figura 2	Frentes de onda	87
Figura 3	Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)	118
Figura 4	Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)	119
Figura 5	Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)	119
Figura 6	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	133
Figura 7	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	133
Figura 8	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	141
Figura 9	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	141
Figura 10	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	152
Figura 11	Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Exemplo 1: partículas	128
Quadro 2	Exemplo 2: partículas	129
Quadro 3	Exemplo 3: partículas	131
Quadro 4	Exemplo 4: partículas	131
Quadro 5	Exemplo 5: partículas	132
Quadro 6	Exemplo 6: partículas	135
Quadro 7	Características de partículas e ondas	138
Quadro 8	Exemplo 7: ondas	139
Quadro 9	Exemplo 8: ondas	140
Quadro 10	Exemplo 9: ondas	140
Quadro 11	Exemplo 10: ondas	143
Quadro 12	Exemplo 11: ondas	143
Quadro 13	Exemplo 12: elétrons	149
Quadro 14	Exemplo 13: elétrons	149
Quadro 15	Exemplo 14: elétrons	150
Quadro 16	Exemplo 15: elétrons	151
Quadro 17	Exemplo 16: elétrons	154
Quadro 18	Exemplo 17: elétrons	155
Quadro 19	Linguagem coloquial x linguagem científica	157
Quadro 20	Texto 9: partículas	161
Quadro 21	Texto 15: partículas	162
Quadro 22	Texto 19: ondas	162
Quadro 23	Texto 30: ondas	162
Quadro 24	Texto 34: elétrons	162
Quadro 25	Texto 39: elétrons	163
Quadro 26	Texto 48: fenda simples e dupla	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Produção textual: partículas 160
Tabela 2 Produção textual: ondas 160
Tabela 3 Produção textual: elétrons 160

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	15
1.1	**O Problema de Pesquisa**	16
1.2	**Objetivos**	17
1.3	**Estrutura da Tese**	18
2	**CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES: O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA**	20
2.1	**Algumas Tendências da Comunicação em Sala de Aula**	24
2.2	**Aspectos da Comunicação em Paradidáticos**	26
3	**MODELOS MENTAIS**	29
3.1	**Pontos de Partida**	29
3.2	**A Imaginação**	30
3.3	**Racionalismo Moderno**	32
3.4	**Imaginação Simbólica**	33
3.5	**Algumas Considerações sobre Modelos Mentais**	36
3.6	**Modelos Mentais no Campo do Conhecimento Científico**	40
4	**EXPERIMENTOS MENTAIS**	46
4.1	**Experiências e Experimentos: Algumas Considerações**	46
4.2	**Experimentos Mentais: Contextos Históricos**	47
4.2.1	**O pensamento de Aristóteles**	49
4.2.2	**As argumentações de Galileu**	51
4.3	**Experimentos Mentais: Origem do Termo**	56
4.4	**Experimentos Mentais: Uma Possível Classificação**	58
4.5	**Importância dos Experimentos Mentais**	63
4.6	**Buscando Alguns Contextos das Experiências Mentais**	66
4.7	**Experimentos Mentais no Ensino de Ciências**	70
4.8	**Experimentos Mentais nos Livros Didáticos**	78
5	**O EXPERIMENTO MENTAL ABORDADO NESTE TRABALHO**	83
5.1	**O Experimento da Dupla Fenda: Alguns Pressupostos Históricos**	83

5.2 Retomada do Confronto Corpúsculo Versus Onda para a Radiação Eletromagnética e o Princípio da Complementaridade de Bohr 88
5.3 O Princípio da Incerteza de Heisenberg 89
5.4 O Experimento da Dupla Fenda com Elétrons 92

6 BASES TEÓRICO-METODOLÓGICAS 95
6.1 A Vertente Qualitativa 97
6.2 Abordagem Etnometodológica 99
6.3 Percurso Analítico 101
6.4 Alguns Pressupostos Teóricos da Análise do Discurso 104
6.5 Análise Textual Discursiva 109
6.6 Corpus da Pesquisa 113
6.6.1 Desenvolvimento empírico 116
6.6.2 Estratégia de trabalho 116
6.6.3 Sujeitos e ambiente da pesquisa sobre o experimento da Dupla Fenda 117
6.6.4 Organização sequencial das atividades 118

7 INTERPRETANDO OS DADOS: UMA LEITURA QUALITATIVA 123
7.1 Sistema com Partículas 123
7.1.1 O olhar do pesquisador e do professor: aspectos gerais do desenvolvimento 123
7.2 Fragmentos das Falas 127
7.2.1 O professor 128
7.2.2 As representações mentais 130
7.2.3 Momento da discussão 135
7.3 Sistema com Ondas 136
7.3.1 O olhar do pesquisador e do professor: aspectos gerais do desenvolvimento 136
7.3.2 Fragmentos das falas 138
7.3.2.1 O professor 139
7.3.2.2 Representações mentais 140
7.3.2.3 Momento da discussão 142
7.4 Sistema com Elétrons 144
7.4.1 O olhar do professor e pesquisador sobre aspectos gerais do desenvolvimento das atividades 144
7.4.2 Fragmentos da fala 148
7.4.2.1 O professor 149
7.4.2.2 Representações 151

7.4.2.3 Momento da discussão 153
7.5 Linguagem Coloquial x Linguagem Científica 156
7.6 Análise Textual Discursiva 158

8 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE 165

9 CONCLUSÃO 168

REFERÊNCIAS 172

APÊNDICES 184

1 INTRODUÇÃO

Esta tese trata da implementação de uma sequência didática sobre o comportamento das entidades físicas: partícula, onda e partícula-onda no Experimento da Dupla Fenda, numa versão adaptada de Feynman e colaboradores, e foi desenvolvida com estudantes de terceira série do ensino superior do curso de Química, disciplina Química Quântica, de uma universidade pública estadual. Em certa medida, a sequência didática consiste no desdobramento de um tipo de experimento denominado experimento mental, que é fruto de uma "interrogação metódica"[1], visando encontrar respostas para dúvidas colocadas num plano que não é o do visível.

Alguns antecedentes que influenciaram a definição da base empírica desta tese podem ajudar a entender melhor sua formulação e desdobramentos. No primeiro semestre de 2006, acompanhamos uma sequência de aulas, com o propósito de trabalhar a aplicação de um *software* criado para representação de funções complexas, denominado *Visual Quantum Mechanics*. Como evidenciado pelo título, ele se aplica à visualização, via mapa de cores, de sistemas descritos pela Mecânica Quântica, dentre os quais o experimento da dupla fenda com elétrons. Certamente, tal abordagem se configuraria numa pesquisa específica de grande interesse nosso e dos estudantes, por se tratar da aplicação de tecnologias de comunicação e informação no ensino de assuntos naturalmente complexos. Ocorreu que, nesse semestre letivo, em função das diversas experiências realizadas em salas de aula, em que observamos a dinâmica das aulas do professor de Química Quântica, os contornos desta tese tornaram-se recorrentes. Passamos a perceber que os estudantes, já na metade do curso de Química, e considerados excelentes na participação às aulas e com bom nível de conhecimentos específicos, mostravam-se pouco familiarizados com a prática dialógica apesar da insistência do professor.

Preocupados com o processo de produção e circulação dos significados e tendo como reflexão de pesquisa a necessidade de provocar mudanças na dinâmica da produção discursiva e escrita no ensino de Química Quântica, buscamos, nas aulas, a identificação de alguma problemática que correspondesse, de fato, ao que a literatura, os debates e outras formas de comunicação têm divulgado nas últimas décadas.

[1] O termo "interrogação metódica" é utilizado por Oliveira (2002, p. 155) para denotar que os experimentos mentais pressupõem uma linguagem especial, em que se formulam perguntas e se interpretam as respostas.

1.1 O Problema de Pesquisa

As análises preliminares informais, levadas a efeito durante um semestre letivo indicaram o problema de pesquisa: *os alunos observados demonstravam dificuldades importantes em explicar e debater suas ideias quando estas exigiam deles o domínio da verbalização de conhecimentos científicos da Física clássica e moderna, de maneira significativa, inteligível e dinâmica.* Por exemplo, frente a uma questão que exigia a formalização matemática, a participação aumentava ou, pelo menos, fluía de maneira a contar com a participação de vários estudantes. Contraditoriamente, se o aluno era levado a expor suas ideias, na explicação de um fenômeno que exigia mais abstração, a maioria só conseguia alcançar o significado da questão discutida se o professor fornecesse muitas pistas. Mesmo assim, as conexões pretendidas, em alguns momentos, não se realizavam.

Assim sendo, um estudo com esses acadêmicos, que pudesse ultrapassar a linearidade própria de alguns tópicos de conteúdos, poderia trazer contribuições metodológicas no sentido de redimensionar o ensino de química quântica sob novos enfoques. Nessa perspectiva, formulamos a questão que compõem, em diferentes níveis de profundidade, nosso objeto de estudo:

- Como promover situações de ensino que alimentem o diálogo e o questionamento sobre os conhecimentos científicos?

Assim, o que desejamos, ao definir as questões que embasaram o objeto de estudo desta investigação, é evidenciar as fortes implicações das abordagens puramente quantitativas que cotidianamente se estabelece no ensino superior, as quais são pouco favorecedoras da comunicação oral e escrita em termos de aplicações mais significativas dos conhecimentos científicos. Frente às questões apontadas, construímos a proposição principal da pesquisa: *o ensino de química quântica e as abordagens metodológicas utilizadas pelo professor não estão calcados na necessidade de ensino questionador, dinâmico, processual e dialógico. Como proposição secundária: a concepção de linguagem científica como instrumento de comunicação verbal e escrita é fundamental para uma leitura crítica de mundo.*

Em função desses indicadores, abandonamos o propósito de trabalhar a visualização do fenômeno por meio de simulação computacional, inicialmente objeto de investigação, e adotamos como foco central o processo de comunicação entre o professor e os alunos ao fazerem uso de experiências mentais. Nossa ênfase passou, então, à interação professor-alunos, com o propósito de, efetivamente, instigar o processo de verbalização dos

conhecimentos científicos. Essa mudança de ênfase nos obrigou a diversificar as alternativas didáticas e a redefinir o trabalho com os conteúdos, de maneira que pudessem estimular os processos mentais dos alunos na solução de questões sobre o comportamento de entidades paradigmáticas em Física, a saber, partículas, ondas e partículas-ondas.

Passamos a perceber que, em função da necessidade do debate científico, indispensável para a compreensão e elaboração dos conceitos relacionados ao comportamento dual do elétron, conteúdo do programa disciplinar daquele momento letivo, havia necessidade de se resgatar e consolidar conceitos da física clássica. O Experimento da Dupla Fenda mostrava-se apropriado para lidar com tais conceitos e com a complexa relação professor-aluno, quando se pretende provocar a discussão e a participação dos estudantes, valorizando os diversos modos de tornar possível a conjugação entre o saber (conjunto de conteúdos) e a relação simbólica (comunicação).

O experimento versa sobre o comportamento de partículas, de ondas e de elétrons ao atravessarem, em momentos específicos para as diferentes entidades, dispositivos experimentais com uma e com duas fendas em geometria específica. Como recurso didático, o experimento se mostra bastante adequado para gerar questionamentos, propor debate, instrumentalizar o professor no âmbito teórico e prático, identificar e resolver os conflitos cognitivos postos na realização das atividades. Por fim, permite aos estudantes gerirem e usarem, espontaneamente, processos de raciocínio que visem dar sentido aos fenômenos do mundo físico.

1.2 Objetivos

Os contornos da pesquisa foram redefinidos com base, sobretudo, em dois grandes princípios teóricos. De um lado, tentamos resgatar algumas propriedades de entidades físicas clássicas, como partículas e ondas, de leis da física clássica que nos são familiares e, por fim nosso foco de interesse maior, o elétron, cujas propriedades têm desdobramentos na estranheza do mundo quântico. De outro, as experiências mentais, por terem sido intensivamente utilizadas pela comunidade científica, com o intuito de explicitar seus pontos de vista sobre suas descobertas revolucionárias e ou paradoxais e, sobretudo, pelas possibilidades de questionamentos.

Definidos os novos contornos da investigação, nossa ênfase passou a ser dada a procedimentos didáticos que favorecessem o processo, o diálogo e a reflexão sobre os fenômenos em estudo. Assim sendo, para levar a efeito o propósito desta investigação,

superação das práticas comumente desenvolvidas nas salas de aula, nós buscamos entender as produções discursivas (oral e escrita) e representações mentais dos sujeitos da pesquisa, bem como os entraves eventualmente postos à efetivação de abordagens que valorizam o discurso e a heterogeneidade dialógica.

Como objetivos, estabelecemos:

- Programar uma sequência didática, por meio de diversificadas alternativas metodológicas, para que os estudantes comuniquem, de forma oral e escrita, os resultados de suas elaborações mentais acerca do Experimento da Dupla Fenda.
- Resgatar e consolidar conceitos da Física Clássica e Mecânica Quântica, em particular para as entidades projéteis, ondas e elétrons.
- Apontar possibilidades metodológicas que subsidiem a prática sobre o uso de alternativas didáticas que valorizem o ensino processual, questionador e dialógico.

1.3 Estrutura da Tese

1. Na *Introdução,* remetemos o leitor à questão da pesquisa, objetivos e o percurso seguido na escolha do ambiente e sujeitos da investigação.
2. Em *Considerações Preliminares,* destacamos alguns resultados de pesquisas que abordam conhecimentos da Física e da Mecânica Quântica. De modo geral, estes resultados embasam e justificam nossa questão de pesquisa.
3. No capítulo *Modelos Mentais como Ponto de Partida,* destacamos a imaginação como forma de pensamento criativo, com seus desdobramentos para o conhecimento científico e o ensino em geral. Os modelos mentais, neste capítulo, são discutidos segundo Johnson-Laird.
4. No capítulo denominado *Experimentos Mentais: características e contextos,* resgatamos alguns experimentos mentais que foram importantes no processo de elaboração de conceitos, sobretudo na formulação da Mecânica Quântica. Apresentamos algumas características desses experimentos e destacamos sua importância no ensino de ciências.
5. *O experimento mental abordado neste trabalho* resgata alguns pressupostos históricos do experimento da dupla fenda e discute, nos seus aspectos gerais, a

retomada do confronto corpúsculo versus onda para a radiação eletromagnética e princípio da complementaridade de Bohr. Discute ainda alguns aspectos do experimento da dupla fenda com elétrons.

6. Em *Fundamentos Teóricos e Metodológicos da Pesquisa,* apresentamos os princípios metodológicos que orientaram a escolha dos métodos específicos de coleta e análise de dados. A Pesquisa Qualitativa é abordada, inicialmente, sob aspectos gerais e, na sequência, as questões que atendem à finalidade desta pesquisa, com ênfase nos estudos etnometodológicos. A Análise do Discurso constitui-se em nossa base de análise das construções interativas e comunicativas. Por fim, apresentamos o *corpus* da pesquisa.
7. O capítulo *Interpretação e Análise dos Dados* consiste, especificamente, na análise dos dados propriamente dita, considerando-se diferentes aspectos, como a possibilidade de evidenciar a comunicação entre professor/estudantes e as manifestações da linguagem científica no âmbito do ensino. A ferramenta analítica utilizada fundamenta-se, em especial, na Análise do Discurso da linha francesa, entrecruzando com algumas categorias elaboradas com base nas representações mentais dos sujeitos investigados. Combinamos diferentes métodos e perspectivas teóricas distintas no tratamento do fenômeno. Por fim, na *Conclusão*, são feitas propostas de encaminhamento do ensino, visando à mobilização da imaginação, tomando-se por base os resultados obtidos e a incerteza, chave da compreensão da ciência moderna.

2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES: O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA

Estudos atuais põem em destaque que, mesmo depois dos desdobramentos das teorias educacionais críticas na universidade, ainda sentimos as fortes implicações das lentas tentativas de mudanças no âmbito dos conhecimentos científicos. Embora a discussão atual exija uma redefinição dos conteúdos e abordagens, um novo modo de ensinar, que valorize o aspecto processual, dinâmico e formativo, a abordagem qualitativa, é ainda pouco empregada nos cursos da área de exatas do ensino superior. Com isso, podemos inferir que, na universidade, a ênfase à abordagem que valoriza a transmissão do conhecimento parece ser predominante.

Apesar desse quadro, a história das investigações em didáticas das ciências mostra que, ao longo das duas últimas décadas, os debates acerca da dinâmica da comunicação em sala de aula começaram a ganhar corpo entre alguns pesquisadores. Vários deles vêm dedicando muitas de suas reflexões à investigação da Mecânica Quântica nos ensinos médio e superior. Dessa forma, a temática em questão passou a ter importância fundamental na área de Educação em Ciências, que conta hoje com um número significativo de trabalhos publicados no campo da Física. Dentre esses pesquisadores, apenas para citar alguns exemplos destacamos[2] Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009); Montenegro e Pessoa Junior (2002); Montenegro (2000); Greca e Moreira (2001); Ostermann e Moreira (2000, 2001); Pinto e Zanetic (1999). Em nível internacional, Müller e Wiesner (2002); Jones (1991); Stefanel (1998); Petri e Niedderer (1998) e Fagundes (1997).

Em termos das especificidades da Física, Greca e Moreira (2001) fornecem uma importante revisão ao analisar trabalhos publicados nas mais reconhecidas revistas da área. Eles buscam em literatura nacional e internacional, os resultados de pesquisas sobre conteúdos de Mecânica Quântica, sugeridos como introdutórios no ensino médio e superior. Para realizar a revisão, os autores pautam-se em três grandes grupos: concepções dos estudantes; críticas à abordagem tradicional e propostas de inovações didáticas. Além desta classificação, destacam da revisão algumas tendências e ampliam-nas, adicionando ênfase nos aspectos histórico-filosóficos e nos aspectos experimentais.

---

[2] Para melhor caracterização da contribuição desses autores, incluindo resultados de diversas pesquisas em nível nacional e internacional, ver Greca e Moreira (2001) e também Ostermann e Moreira (2000). Embora seus textos tratem de uma revisão bibliográfica sobre a inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, abordam também o ensino superior.

As investigações dos autores aqui mencionados adquirem dimensão e sentido diferentes, em função do quadro teórico-metodológico em que se inserem. Assim, Greca e Moreira (2001) e também Ostermann (2004) tecem considerações, destacando de seus trabalhos aspectos importantes que podem nos conduzir para outras buscas, no sentido de novas aplicações.

De modo geral, a revisão mostra que no ensino médio os estudantes têm dificuldade em entender o conceito de dualidade onda-partícula; afirmam que as partículas se movimentam em linha reta; o elétron é uma partícula que possui massa, velocidade e órbita, mas movimenta-se numa onda; falam em nuvem de elétrons, mas consideram-no partícula. O conceito de probabilidade é usado para expressar algo que não se conhece exatamente. Somente um número inexpressivo de alunos considera que a visualização do elétron não é possível e sequer chegam a entender que estão diante de um diferente marco conceitual. Estes são apenas alguns dados da vasta revisão que os autores realizaram em nível de ensino médio.

No que tange ao ensino superior, Greca e Moreira (2001) afirmam, as pesquisas são mais recentes e escassas. Os resultados de um dos exemplos apresentado pelos autores visando detectar os modelos mentais utilizados pelos estudantes para compreensão do conceito dualidade onda-partícula; princípio da incerteza e indeterminação revelou que os estudantes utilizam inapropriadamente a *terminologia quântica* denotando conhecimentos bastante superficiais de Mecânica Quântica.

Ainda na perspectiva da investigação realizada por Greca e Moreira (2001), uma das maiores dificuldades na aprendizagem de conceitos da Física Moderna e Contemporânea parece ser de caráter filosófico, por não haver consenso sobre qual base filosófica a Mecânica Quântica deve ser ensinada. Na perspectiva discutida por Greca e Moreira (2001), nos três grupos tomados como base de suas investigações, as dificuldades que os estudantes pertencentes a distintos níveis de escolaridade encontram na abordagem de conceitos quânticos são importantes, e indicam que as pesquisas nessa modalidade de ensino devam ser ampliadas.

Uma reflexão em relação ao estudo da Mecânica Quântica foi feita por Nuñez, Neves e Ramalho (2002). Os autores investigaram as concepções de estudantes de Licenciatura e Bacharelado em Química sobre os conceitos dualidade onda-partícula e princípio da incerteza de Heisenberg. Os livros didáticos utilizados pelos estudantes foram também investigados com o objetivo de identificar a influência dos mesmos no ensino. A pesquisa levou os autores a ressaltar resultados corriqueiramente observados em livros

didáticos, como tipo de escrita conservadora e dogmática, isentos de espaço para controvérsias e posicionamentos.

Os modelos não são familiares na abordagem do conhecimento científico e sua epistemologia. Em geral, revelam os limites da aplicação dos conhecimentos e são confundidos com a realidade. Os resultados da investigação revelam implicações negativas importantes, como visão de mundo e de matéria incompatíveis com os avanços da ciência e da tecnologia no mundo atual. Na essência, os estudantes não são capazes de diferenciar modelos clássicos e quânticos.

Ainda na perspectiva dos modelos científicos, Lagreca (1997), em sua dissertação de mestrado investigou os tipos de representações mentais utilizadas por estudantes de Física Geral. O estudo foi realizado com estudantes de nível superior indicando a importância de se investigar processos mentais indiretamente, por meio das manifestações verbais, simbólicas e pictóricas. Os resultados atestam a importância dos modelos mentais e sugerem, especificamente nesta investigação, que quanto mais elaborados sejam tais modelos, mais facilmente os estudantes poderiam fazer a transposição dos conhecimentos para outros contextos que não o da sala de aula.

Montenegro (2000) também aborda a questão dos modelos científicos, especificamente numa pesquisa de mestrado sobre as interpretações adotadas pelos alunos quando estudam Mecânica Quântica. O autor fundamenta-se na Filosofia, na Física e na Psicologia Cognitiva para explorar as interpretações *privadas* dos alunos com base nas interpretações *sistematizadas* e conclui que os alunos utilizam-nas de formas diversificada tais como as representações imagéticas e a linguagem do formalismo matemático. Por fim, eles podem utilizar representações internas distintas ou interpretações privadas distintas e até contraditórias. Outro aspecto fundamental de suas conclusões é que alguns conceitos básicos da Física Quântica, como os envolvidos no experimento da dupla fenda para um único elétron, não são suficientemente trabalhados nos cursos regulares dessa disciplina.

Em Brockington (2005), encontramos as especificidades e os detalhes de uma sequência didática sobre alguns conceitos de Física Quântica, com o intuito de apresentar aos estudantes de ensino médio, a dualidade onda-partícula. Por meio de diferentes interpretações, a Mecânica Quântica foi discutida levando em conta as abordagens filosóficas de caráter epistemológico e ontológico. O percurso analítico adotado pelo autor foi o da Transposição Didática, que considera o saber científico, o saber a ensinar e o saber ensinado como fundamentais, já que possibilita abordagens mais abrangentes em relação à ciência presente nos programas escolares e nos livros didáticos.

Considerando que esse tipo de abordagem é incomum no ensino médio, a pesquisa de mestrado de Brockington (2005), se faz uma contribuição de indiscutível valor, tanto para esse nível de ensino, como para reflexões de outros níveis de transposição didática que incluam aspectos filosóficos. A referida pesquisa foi conduzida de maneira a explorar diversas estratégias na abordagem da dualidade onda-partícula, possibilitando o uso da imaginação e o poder de abstração. Nesse sentido, essa forma de trabalhar os conhecimentos de Física Quântica, segundo o autor, permitiu compreender a trajetória cognitiva dos alunos e as necessidades de aprendizagem, bem como fundamentar a ação do professor.

Em *Aspectos preditivos da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica: uma proposta teórico-metodológica para alunos de ensino médio* (dissertação de mestrado), Coelho Neto (2006) enfatiza o aspecto essencialmente probabilístico da Mecânica Quântica implícito no princípio da incerteza. Dentre os campos de conhecimentos focalizados, que buscam o aspecto preditivo das teorias físicas, é discutido o conceito de estado quântico numa abordagem mais fenomenológica, em detrimento das analogias em relação ao estado clássico. A pesquisa revela resultados significativos sobre o aspecto preditivo intrinsecamente probabilístico da Mecânica Quântica. Esse resultado se estende aos eventos individuais, como na interferência de elétrons lançados um a um sobre a dupla fenda, experimento de fronteira realizado no Japão na década de 1980 (TONOMURA, 1989). De acordo com o autor, os resultados representam um avanço em termos de introdução de fenômenos quânticos e a percepção das limitações do determinismo clássico nos cursos de nível médio.

Com o intuito de provocar uma reflexão crítica acerca das abordagens tradicionalmente adotadas nos programas de ensino de Física, Fagundes (1997), em sua dissertação de mestrado, busca estabelecer, nas discussões acerca do comportamento dual da luz, um paralelo entre a Física Clássica e a Física Quântica. A autora baseia-se na argumentação proposta pela escola de Copenhague e defende que o argumento da complementaridade possibilita um olhar diferente à estrutura da Física.

A base experimental da pesquisa de Fagundes (1997) é o interferômetro de Mach-Zehnder, por meio do qual se buscou apontar os limites da utilização de modelos clássicos para explicar o comportamento dual da luz e as implicações nos limites quânticos. Como desdobramento imediato, a pesquisa, que visava propor, discutir e provocar uma ruptura curricular no ensino médio possibilitou a realização de um curso de fundamentos da física quântica a professores da rede púbica, culminando numa proposta de seu ensino na escola de nível médio. Os paralelos entre o clássico e o quântico e as representações de partícula, onda e onda-partícula indicaram a necessidade de romper com a concepção clássica de física.

Terrazan (1994), em sua tese de doutorado, quando trata da inserção de temas essenciais no currículo, reconhece a importância da autonomia do professor na escolha e adoção de metodologias adequadas para o ensino de Mecânica Quântica. O autor ressalta para este ensino, a necessidade fundamental da história da ciência e das experiências mentais como estratégias para a construção de conceitos complexos ou de natureza controvertida. Essa discussão nos remete à questão desta pesquisa, sobre experimentos mentais e a importância de alternativas metodológicas que apresentem questões relevantes, desafiadoras e, por extensão, favorecedoras de práticas dialógicas.

As experiências e os experimentos mentais têm status epistemológico central na Física. No campo da educação em Física, integra nossa pesquisa tal como um conjunto de experiências de conhecimento materializado no ensino, no momento em que os alunos vivenciam práticas nas quais tentam solucionar problemas, fazendo uso dos processos mentais. Neste trabalho, tal classe de experimentos é discutida por vários autores, dentre eles; Sorensen (1991); Brown (1991a); Cooper (2005); Gendler (2000, 2003); Helm e Gilbert (1985); Helm, Gilbert e Watts (1985); Norton (2004); Snooks (2006); Valentzas, Halkia e Skordoulis (2000)[3].

2.1 Algumas Tendências da Comunicação em Sala de Aula

No âmbito das tendências sobre a comunicação de conhecimentos científicos, surge a linha de investigação que trata de analisar a estrutura e a dinâmica da comunicação em sala de aula. Tal tendência busca compreender a complexidade do processo e analisar como se dá a circulação dos saberes em termos de discurso oral e escrito, o que requer a elaboração de uma metodologia particular, própria do campo da linguística, e relativamente nova no âmbito das ciências da natureza.

Atualmente, encontram-se disponíveis resultados de pesquisas de vários autores que têm contribuído em seus estudos com os processos interpessoais e grupais da relação professor-aluno, bem como as dificuldades que os estudantes apresentam para organizar, de forma coerente, um conjunto de ideias científicas. Nessa perspectiva, eles buscam compreender a transformação entre o discurso científico e o discurso escolar, portanto, o

[3] Abordaremos estes autores e outros representantes da classe de experimentos mentais no capítulo 4.

processo de significação originado e desenvolvido por meio do uso da linguagem e outras formas de comunicação.

Sardà Jorge e Sanmartí (2000) alertam que é difícil identificar claramente se as dificuldades apresentadas pelos estudantes se devem à má compreensão dos conceitos ou à falta de domínio suficiente do gênero linguístico. Citando Lemke (1997), as autoras afirmam que muitos dos problemas de aprendizagem nas aulas de ciências se devem tanto ao desconhecimento do padrão temático como do padrão estrutural próprio do texto científico. Nesse sentido, esse desconhecimento pode ser decorrente da ideia de que os diferentes gêneros linguísticos são objetos de aprendizagem nas aulas de línguas e não se constituem preocupação das aulas de ciências.

Uma das conseqüências mais imediatas e visíveis do ensino de conhecimentos científicos é a dificuldade que os estudantes enfrentam para organizar e expressar um conjunto de ideias. De acordo com Sardà Jorge e Sanmartí (2000), essa dificuldade se estende ao diferenciar fatos observáveis e inferências, identificar argumentos significativos e organizá-los de forma coerente. Para além desses aspectos, está também a distinção entre os termos de uso científico e os de uso cotidiano e ainda o uso de linguagem coloquial. Quando escrevem, dizem as autoras, ou são orações longas que mostram dificuldades de coordenação ou subordinação, ou são muito curtas, sem justificar qualquer afirmação.

Parece não haver dúvidas de que se aprendem as ideias científicas ao serem comunicados seus modelos e suas teorias, de forma que possam validar as representações que cada sujeito constrói sobre a realidade. Embora a linguagem científica tenha suas especificidades, é fundamental que ela seja trabalhada em sala de aula, visto que o falar e o escrever são também condições necessárias para transcender o âmbito dos conhecimentos conceituais e possibilitar que os estudantes expressem suas ideias. Discutindo tal argumentação, Sardà Jorge e Sanmartí (2000, p. 407), asseveram que "para aprender ciência, é necessário aprender a falar e escrever (e ler) ciência de maneira significativa".

Dias e Almeida (2008) investigaram as possibilidades de utilização de textos científicos de Física Moderna e Contemporânea voltados para o ensino médio. Os textos foram lidos por licenciandos em Física, para efeito de julgamento sobre a utilização na prática docente do ensino médio. Os resultados, de acordo com os autores, indicam que é necessário fundamentar novas práticas no campo específico da comunicação em sala de aula.

Perez e Caluzi (2006, p. 59) na obra *Divulgação científica e o ensino da Física Moderna*, indagam sobre o papel dos meios de comunicação como "vetores da popularização da Ciência e do cientista no seio da sociedade". Esses autores defendem que os

conhecimentos veiculados por diferentes meios de divulgação científica, devam ser, de fato, instrumentos de transformação da realidade, em detrimento dos interesses perversos do capitalismo e da indústria cultural. Nessa perspectiva, a decodificação da linguagem, que leve a melhorar significativamente a compreensão dos conceitos, leis, fenômenos ou qualquer evento de natureza científica tanto em nível formal de escolaridade como outros meios informais e não formais, é vista pelos autores como de fundamental importância.

A ênfase dada por Perez e Caluzi (2006), especificamente, se refere à Física Moderna, onde os desafios da divulgação científica são imensuráveis. Faltam-lhe critérios rígidos para analisar e editar as informações e servir à comunicação e, mais do que comunicar se manifestar amplamente "nas relações de sentido estabelecidas pelos indivíduos num contexto social e histórico" (PEREZ; CALUZI, 2006, p. 75).

Os aspectos da eficiência da comunicação, considerando o discurso científico e o discurso cotidiano, no sentido da decodificação de tais discursos, são também abordados num diálogo com vários autores que discutem concepção de linguagem e da análise do discurso.

2.2 Aspectos da Comunicação em Paradidáticos

Saindo do âmbito das pesquisas divulgadas em revistas científicas e teses, consideramos também de importância fundamental as publicações em livros paradidáticos, privilegiando uma linguagem que procura romper com a visão linear, simplesmente cumulativa do desenvolvimento da Ciência. Uma obra a ser destacada é a de Pessoa Júnior (2003, 2005), *Conceitos de Física Quântica*, volumes I e II. O primeiro deles traz uma discussão bastante interessante sobre as várias possibilidades de interpretações plausíveis para a Teoria Quântica, enquanto que o segundo discute vários experimentos que foram realizados mais recentemente em virtude de impossibilidades técnicas que se apresentavam à época em que foram idealizados na mente. Menezes (2005), com a publicação de *A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico,* discute ciências e aplicações tecnológicas de forma a instigar o leitor a refletir sobre fundamentos clássicos da Física e também teorias relativísticas e quânticas. Ambos os autores expõem um canal de comunicação mais acessível, pelo qual se transitam saberes previamente estabelecidos sem, contudo, perder o reticulado do complexo sistema em que se inserem os conhecimentos físicos, que muitas vezes se constituem tarefa árdua e espinhosa para boa parcela dos

estudantes. Dessa forma, privilegiam um jogo discursivo que pode resultar em leituras mais prazerosas e mais universais, pouco disponíveis como recursos didáticos.

Temos particular interesse na publicação de *Lectures on Physics*, de 1964, da qual selecionamos o capítulo "Comportamento Quântico", que, numa versão adaptada e traduzida por nós, tornou-se o norteador teórico-metodológico do objeto e das questões desta pesquisa. Feynman e colaboradores promovem um diálogo bastante interessante com seus interlocutores na proposição de questões polêmicas e nas possibilidades de "respostas" que o fenômeno suscita, com base no Experimento da Dupla Fenda. Saliente-se que, além da ênfase na concepção dialógica, a linguagem se apresenta em oposição à concepção que a torna formal, neutra e utilizável independentemente dos fins educativos. Elaborado há mais de quatro décadas, é ainda um texto muito instigante, apropriado como referencial no debate contemporâneo por propiciar um clima favorável a perguntas, ao questionamento, ao debate e à reflexão.

Em termos de especificidade, esses autores contemplam variados aspectos do ensino da Física Clássica e da teoria quântica que implicam em concepções, representações e usos da linguagem, sendo a maioria deles voltados para a aprendizagem em vários níveis de ensino.

- A comunicação verbal e escrita, neste campo do conhecimento, mostra a complexa relação entre o sujeito e a linguagem. Em todas as situações pesquisadas, parece que se deva incentivar a produção do discurso escolar e também indicar novos objetos de investigação para as ciências e a linguagem;
- Para finalizar estas breves considerações sobre as contribuições dos vários autores, dentre os que consultamos, podemos considerar que seus fundamentos teóricos e metodológicos são consoantes com objetivos de pôr em prática os conteúdos básicos de Mecânica Quântica nos diferentes níveis de ensino.

Os resultados das pesquisas aqui elencados, as reflexões de outra natureza e as observações preliminares e informais realizadas em sala de aula nos remetem à questão da pesquisa desta tese. Resumidamente, transitamos nos conhecimentos clássicos e quânticos por meio de um evento que, sob diferentes olhares, permeou boa parte das investigações já realizadas.

A sala de aula, instância de circulação de saberes, também foi objeto de reflexão dos pesquisadores aqui considerados, e as entidades físicas *partícula, onda e onda-partícula*

têm lugar quase comum nas pesquisas aqui mencionadas. As dificuldades em aplicar conceitos da Física Clássica e de Mecânica Quântica, invariavelmente, aparecem como resultados de pesquisa, contudo, evidenciamos que a quantidade de estudos voltados para a comunicação oral e escrita em sala de aula parece ser ainda escassa no Brasil.

Sobre a linguagem, Heisenberg (1987, p. 132) já dizia: "Observemos que é sempre difícil encontrarmos critérios fidedignos que indiquem quais e de que maneira, termos linguísticos devam ser empregados". Afirma o autor que, na teoria quântica, no que diz respeito à utilização da linguagem, não se tem nenhum critério simples para se correlacionar a linguagem matemática aos conceitos da linguagem cotidiana.

As pesquisas sobre a comunicação dos conhecimentos científicos têm mostrado a necessidade de se empreender novos rumos à comunicação verbal e escrita dos conhecimentos científicos em salas de aula. Na perspectiva de tais conhecimentos, dentre as várias ciências, encontra-se a Física Moderna, exercendo cada vez mais influência no cotidiano das pessoas, exigindo, portanto, que sua compreensão seja indispensável para a leitura de mundo.

No capítulo seguinte, serão discutidos os principais fundamentos da representação mental, apontando seus desdobramentos para experimentos mentais.

3 MODELOS MENTAS

3.1 Pontos de Partida

A representação da informação é a unidade básica do pensamento que possibilita a interação entre o mundo interno (entendido como mundo mental, formulado na mente humana) e o mundo externo (tudo que os sentidos possam perceber; tudo que seja extracorpóreo). As teorias sobre a representação da informação se baseiam na hipótese da existência de códigos utilizados para armazenar a informação na memória de longo prazo, mas não explicam a origem desses códigos que deveriam pré-existir a qualquer interação do ser humano com o seu meio. Os códigos que representam a informação são um axioma adotado pelas teorias representacionais.

Sem dúvida, essa discussão conduz à ideia de que podemos formar em nossas mentes mapas cognitivos por meio de informações externas que sejam úteis para elaboração de nossos conhecimentos prévios e, por extensão, nossos conhecimentos científicos. Estamos refletindo sobre o processo de ensino como produção e circulação de sentidos e significados, de tal modo que qualquer mudança na forma de ensinar implica em mudar a dinâmica de produção discursiva. Assim, o sujeito do discurso, além da ideologia, é atravessado também por identidades imaginárias e, nesse sentido, algumas ideias são melhores representadas através de símbolos gráficos enquanto que outras, por imagens.

> A noção de discurso não comporta a idéia de linearidade presente nos esquemas primeiros da comunicação (emissor, receptor, código, referente e mensagem). Na realidade, a língua não é só um código entre outros, não há essa separação entre emissor e receptor, nem tampouco eles atuam numa seqüência em que primeiro um fala e depois o outro decodifica etc. Eles estão realizando ao mesmo tempo o processo de significação e não estão separados de forma estanque (ORLANDI, 1999, p. 21).

Nesse contexto, o sujeito, na sua relação com o outro e em qualquer contexto social, cria e recria de forma dinâmica representações que possibilitam descrever e significar a realidade. Contudo, nenhuma forma de representação mantém realmente todas as

características daquilo que está sendo representado quando queremos representar coisas e ideias.

Cabe ressaltar que não há uniformidade com relação à terminologia empregada acerca de modelos mentais, no entanto, o que parece fundamental nas várias concepções do conceito de modelo mental é a ênfase na ideia de 'rodar' o modelo na imaginação. Um modelo mental pode ser imaginado como conhecimento suficiente sobre um sistema que permite ao usuário experimentar ações mentalmente antes de executá-las.

3.2 A Imaginação

Nosso intuito é propor uma reflexão sobre a imaginação como processo de pensamento vinculado às exigências do raciocínio científico. Portanto, não cabe, neste momento, buscarmos o papel da imaginação nas diferentes correntes filosóficas. Como primeira forma de situar a imaginação, tomemos o campo das representações sobre o qual opera o pensamento. A criação simbólica, nessa perspectiva, age como forma de definir novas representações, sempre considerando as já existentes. Dessa forma, buscamos alguns aspectos acerca da imaginação, no sentido de como ela influencia nossa visão de ciência. Tal abordagem desobriga-nos de lidar com a "linearidade" e as "rupturas" da evolução do pensamento científico, como se apresenta cronologicamente.

O que torna a imaginação essencialmente importante no sistema baconiano é que o conhecimento concebido por Bacon é algo indissociável da produção de novas ideias e do avanço do conhecimento científico. Contudo, Bacon (1999) admite também que a imaginação pode ser fonte de ilusão e, nesse sentido, perigosa, podendo, se não controlada, trazer implicações importantes à razão. A ingenuidade humana pode fantasiar as imagens previamente sentidas, limitando, assim, a razão em conceber o novo. Nessa perspectiva, conforme Oliveira (2002), a preocupação de Bacon é puramente epistemológica, se controlada, pode servir ao avanço do conhecimento científico no processo de descoberta e também no processo de divulgação das ideias. Por outro lado, pode ser prejudicial quando cria falsas ilusões, ou quando se conforma com a estagnação.

Outro empirista que aparece cerca de duzentos anos depois é o filósofo John Stuart Mill (1806-1873), seus estudos versam sobre ciências da natureza e também outros campos do conhecimento como sociologia e moral. Nas ciências, Mill busca fundamentar a

possibilidade de inferir resultados a partir de dados experimentais, no entanto, diferentemente de Bacon, aceita que o pensamento opera com representações abstratas, desde que voltadas para as experiências. Mill (1843) teve seu pensamento influenciado pelas novas descobertas das ciências químicas, como por exemplo, a formação de substâncias a partir da combinação de moléculas, para o que o autor denominou química mental. Assim sendo, a ciência e o saber que não fossem resultados da experiência, não deveriam ser levados em conta, porque eram falsos. Nesse aspecto, ele se aproxima de Bacon, mas, embora admita a necessidade de conhecimento abstrato para a compreensão dos fatos, nega que seja uma atividade criadora.

Como indutivista, Mill admite que a imaginação não tenha lugar algum na elaboração do conhecimento. O pensador sustenta que o pensamento de maneira geral e, em particular, o abstrato (matemática e lógica) vinculam-se aos princípios da experiência empírica (MILL, 1862). Nesse sentido, a associação entre conteúdos da experiência e eventos mentais pode ser estabelecida a partir do princípio de causalidade ou "leis de associação". Por exemplo, a dor física poderá ter como desdobramento um evento mental que se traduzirá em uma provável sensação de "medo" de alguma doença ou qualquer implicação indesejável por parte de um sujeito qualquer.

Gurgel (2006) discute que, com as novas teorias, a lógica abstrata vai conquistando espaço e, com o surgimento da Mecânica Quântica, as novas ideias alteraram profundamente a teoria do conhecimento, causando um impacto ainda maior que a Relatividade de Einstein. Com isso, o papel da imaginação e outros aspectos subjetivos tornaram-se cada vez mais claros na elaboração do conhecimento.

Este último se refere à descrição lógico-analítica e o primeiro momento, o da descoberta, deveria ser relegado aos estudos em Psicologia, Sociologia ou História da Ciência. No entanto, a imaginação e o processo criativo, em sentido amplo, não foram considerados como elementos de análise da Filosofia da Ciência, sendo um tema até hoje pouco explorado.

Sobre o conceito de imaginação, Patrick (2002) mostra uma contradição flagrante que sobrevive ainda hoje. De um lado, o ceticismo com que as culturas ocidentais lidam com a imaginação e, de outro, o prestígio que outras culturas dão ao seu uso. Descobertas recentes, informa o autor, "vêm confirmar os mitos antigos, demonstrando que a imaginação é anterior à linguagem e à cognição. Da superposição mórbida e patológica das representações confusas, pode brotar a imaginação criadora, colocando-nos em contato com a realidade mais sutil" (PATRICK, 2002, p. 152).

As breves considerações aqui abordadas possibilitam entender a importância de se refletir sobre a imaginação como lugar de acontecimentos da história, bem como campo cognitivo experimental.

3.3 Racionalismo Moderno

Passemos agora a buscar alguns elementos que caracterizam a imaginação no contexto do racionalismo moderno, destacando o pensamento de Descartes (1596-1650). Poderíamos iniciar esta discussão lembrando que Descartes não ignora o papel da imaginação no exercício do pensamento, mas sua meta fundamental era a construção de um método (conjunto de regras) que pudesse guiar o indivíduo ao conhecimento "verdadeiro". Na XII Regra para a Orientação do Espírito, notamos claramente o papel da imaginação.

> Enfim, temos de utilizar todos os recursos do conhecimento, da imaginação, dos sentidos e da memória, seja para ter uma intuição clara das proposições simples, seja para pôr entre as coisas que procuramos e aquelas que sabemos, uma ligação adequada que permita reconhecê-las, seja para encontrar as coisas que devem ser comparadas entre si, sem desprezar nenhum recurso da indústria humana (DESCARTES, 1628, p. 73).

A imaginação é concebida por Descartes com sentido duplo, em função da separação que ele faz entre corpo e alma. Segundo ele, é a alma que nos torna verdadeiramente humanos, portanto, diferentes dos animais. O conhecimento verdadeiro está na alma e nunca pode ocorrer a partir de um processo que dependa essencialmente do corpo. Mais tarde, várias "experiências" que faziam uso da imaginação foram consideradas produtoras de bases falsas. A imaginação em Descartes pode atuar apenas como auxiliar do conhecimento "verdadeiro". Nesse sentido, o autor considera o papel da imaginação na intuição, quando esta trabalha com elementos, reproduções fieis de figuras concebidas na realidade. A intuição, nessa perspectiva, não é criativa porque a realidade é previamente organizada por Deus, mas podemos acessar essa realidade interferindo nela, por meio de nossa capacidade de organizar as percepções, de maneira a significá-la, portanto, a imaginação se configura elemento complementar à intuição cartesiana.

Outro ponto da obra de Descartes é sua possível relação com a dedução. Diferentemente da intuição, afirma Gurgel (2006), a dedução é o movimento pelo qual podemos obter verdades a partir de outros princípios, sendo que esse movimento deve ser contínuo e sem nenhuma interrupção do pensamento que vê nitidamente por intuição, cada coisa em particular.

A dedução não é, portanto, um conhecimento imediato, que se apresenta como uma visão atual do pensamento, ao invés disso, acaba sendo dependente da memória e para se evitar erros, essa memória é obrigada a guardar exatamente os passos durante a demonstração. A imaginação pode, portanto, auxiliar a memória, por meio da percepção dos procedimentos realizados na dedução, para que sejam vistos como uma totalidade.

Como podemos depreender dessas considerações, Descartes atribui à intuição um papel de destaque no momento de apreensão da realidade, entendida em sua totalidade, contudo, ele rejeita a imaginação como princípio de obtenção do conhecimento.

3.4 Imaginação Simbólica

O pensamento humano se constitui na capacidade de gerarmos representações mentais para os elementos do mundo que nos habilitam a estabelecer relações, não somente por meio dos sentidos, mas também por meio de construções simbólicas. Bronowski (1997), afirma que

> [...] por meio de imagens reconstruimos acontecimentos que não se manifestam em nossos sentidos – e assim guardamos o passado e criamos o futuro que ainda não existe, e que talvez não venha a existir daquela forma. Por contraste, a ausência de idéias simbólicas, ou de caráter rudimentar, separa o animal do passado e do futuro, aprisionando-o no presente. De todas as distinções entre o homem e o animal, o dom característico que nos faz humanos é a capacidade de usar imagens simbólicas (BRONOWSKI, 1997, p. 25).

Como criação simbólica, a imaginação vincula-se às artes. Mas, desde sua primeira aproximação, busca criar outras representações. No caso das ciências que são fundamentais para a descrição de mundo, servindo de apoio ao pensamento, busca os sentidos da realidade, permitindo a construção de idéias mais elaboradas.

De acordo com Gurgel (2006, p. 53), “o imaginário, definido como o campo de representações sobre o qual o pensamento operará, determina a primeira forma de descrevermos a imaginação que, construindo um campo simbólico, age sempre definindo novas representações, mas com base nos elementos simbólicos já existentes”.

Passemos agora para o campo da representação direta da realidade, diferente, portanto, das abstrações indutivas vistas anteriormente. Essas representações formam o imaginário.

Bachelard (1884-1962), em sua obra *A Psicanálise do Fogo*, publicada em 1938, inaugura seus estudos sobre a imaginação da matéria. Tais estudos seguiram cruzando-se nas obras de filosofia científica e epistemologia com as obras sobre o imaginário. De acordo com o autor,

> [...] precisamos de bem outra coisa ao invés de simples princípios fundamentais: devemos, em particular, adquirir formas de pensamento que nos permitam prever fenômenos muito complicados para que se possa tratá-los mecanicamente de um modo completo. Creio que para forjar estas novas formas de pensamento, deveríamos levar em conta o fato de que o espírito humano é dotado de uma inércia muito grande, e também, poderíamos dizer: de uma grande viscosidade, desloca-se sempre muito preguiçosamente de uma posição de equilíbrio para outra [...]. Se desejarmos alcançar mais rapidamente o equilíbrio, deveremos aplicar durante um tempo muito breve uma força superior à que é estritamente necessária para realizá-lo (BACHELARD, 1995, p. 85).

A citação de Bachelard expõe o descompasso entre o mundo das ideias estagnadas e a vida cotidiana. É sobre a aplicação do conhecimento científico que o autor posiciona-se contra essa inércia e aponta para o domínio da racionalidade teórica quando diz

> [...] é tão agradável para a preguiça intelectual limitar-se ao empirismo, chamar um fato de fato e proibir a busca de leis. Ainda hoje, os maus alunos de física ‘compreendem’ as fórmulas empíricas. Acham que todas as fórmulas, inclusive as que decorrem de uma teoria bem organizada, são empíricas (BACHELARD, 1995, p. 85).

Em certas condições de ensino/aprendizagem, no caso da interação verbal, acaba sendo quase que inevitável buscar o contexto epistemológico capaz de significar as formulações imaginadas.

Holton (1979) apresenta uma importante reflexão acerca da imaginação na ciência. O autor diz que foi a livre criação da mente que permitiu aos cientistas tantas realizações no campo do conhecimento científico, como as leis dos fenômenos que regem a natureza. Assim, a imaginação deve partir de uma relação do sujeito com o exterior, sendo que as primeiras representações mentais que ele adquire através da intuição, formam a base de representações imaginárias que o pensamento operará. Ainda é importante salientar que estas representações não se limitam apenas a elementos conceituais. Gurgel (2006) complementa que nossa habilidade em explicar fatos e fenômenos está relacionada à nossa compreensão daquilo que é explicado, portanto, tal compreensão implica na construção de um modelo funcional de cada situação.

A construção de modelos mentais ou representações mentais permite, de maneira prática, representar um objeto ou uma situação qualquer. O modelo mental de uma sala de aula pode ter diferentes versões, conforme os diferentes usos e inferências que se possa fazer dela e sobre ela. Do projeto ao uso de uma sala de aula, incluem minimamente: identificação do local, projeto, construção, uso que se faz dela, o que se pode dizer sobre ela, etc.

Sobre a imaginação, em sua dissertação de mestrado Gurgel (2006) comenta que é algo pouco considerado em contextos de ensino, principalmente nas aulas de ciências. De igual forma, de acordo com o autor, no âmbito das pesquisas educacionais ainda encontramos poucos materiais que versam sobre a imaginação, tanto do ponto de vista teórico, como prático.

> Existem outros modos (além do racional) de conhecer o mundo físico, É possível um relacionamento do tipo sentimento. Um tal modo de conhecer é caracteristicamente não formal, pode ser não-verbal e acontece num mundo de coisas às quais se atribui um certo grau de realidade. O acesso a esse mundo é feito por meio de sensações, palavras, imagens e intuição, e a mente busca a intimidade do objeto a ser conhecido. Neste tipo de conhecimento não existe a clareza fria da razão (ROBILOTTA, 1988, p. 8).

Outras tendências que tratam da imaginação também deverão vir à tona no sentido de justificar a discussão acerca de modelos mentais. Nesse contexto, as contribuições de Rouse e Morris (1986) também serão consideradas por admitirem categorias, das quais adaptamos algumas das questões propostas para investigar a situação problema desta Tese. Tais categorias referem-se a aspectos diferentes do sistema sob estudo e respondem a cinco questões que descrevem e explicam o sistema e seu comportamento: Como é o sistema?

(descrição do sistema); De que é feito o sistema? (descrição da estrutura do sistema); Como o sistema funciona? (explicação do funcionamento); O que ele está fazendo? (previsão ou explicação do estado do sistema); Para que ele serve? (descrição sobre o propósito do sistema). Embora as categorias propostas pelos autores não sejam tomadas na essência, as questões são pertinentes a quaisquer sistemas que visa o questionamento, a explicação e principalmente, diversificadas formas de constituição do discurso.

Objetivando racionalizar a análise de dados de nossa investigação e evitar duplicações e cruzamentos desnecessários, decidimos tratar, neste capítulo, de alguns referenciais dos modelos mentais, principalmente de Jonhson-Laird (1983). Este autor foi um dos primeiros a disseminar a idéia de modelos mentais construídos por meio da percepção, da imaginação ou de leitura. O autor defende a idéia de que as proposições são representações de significados, totalmente abstraídas, e são verbalmente expressáveis. Afirma ainda que: "Podemos supor que os modelos mentais [...] desempenham um papel central e unificador, na representação de objetos, estados de coisas, seqüências de acontecimentos" (JONHSON-LAIRD, 1983, p. 397).

3.5 Algumas Considerações Sobre Modelos Mentais

Embora utilizados há algumas décadas, não se encontra na literatura um padrão de definição explícito sobre modelos mentais. Pode-se dizer que o termo "modelo mental" teve suas contribuições enquanto elementos conceituais em 1983, com a publicação de dois livros, ambos intitulados: *Mental Models*. O primeiro deles, de Gentner e Stevens (1983), é uma coleção de contribuições a um seminário sobre essa temática. O segundo de Jonhson-Laird (1983), o autor procura explicar o raciocínio dedutivo e a compreensão de texto. Contudo, afirma Lagreca (2006), a formulação moderna do conceito de modelo mental deve-se às ideias de Kenneth Craick, em 1983, segundo o qual, os seres humanos traduzem eventos externos em modelos internos e raciocinam manipulando estas representações em ações ou avaliações de fatos externos.

Para Johnson-Laird (1983), modelos mentais estão, supostamente, na cabeça das pessoas, e sua exata constituição é uma questão empírica. Apresentam-se sob variadas formas e podem servir a diferentes propósitos e, em particular, na interpretação da linguagem, bem como para fazer inferências. Nessa perspectiva, o processamento da linguagem se configura

como um dos mais importantes domínios de aplicação da teoria dos modelos mentais. O indivíduo constrói seus modelos com base nas leituras que faz dos eventos que ocorrem na natureza. Para o autor, já que a percepção do mundo é baseada em modelo, então o discurso sobre o mundo, de igual forma deve ser baseado em modelo, e a habilidade para fazer inferências, permite-nos antecipar até eventos remotos. O autor considera que há dois tipos de inferências: i) explícitas, são as que exigem um esforço consciente para integrar a informação, como nos processos dedutivos, que em geral ocorrem com atividades científicas; ii) implícitas, integram os processos cotidianos de julgamento como a compreensão do discurso, portanto conhecimentos mais superficiais.

Johnson-Laird (1983) disponibilizou um vasto estudo acerca de modelos mentais que incluem: *representação proposicional, representação mental, modelo mental e imagens*, do qual tomamos apenas os aspectos que os identificam e, em certa medida, fundamentam as representações dos estudantes, objeto empírico que será considerado no *corpus* da pesquisa. Portanto, cabe destacar do trabalho de Johnson-Laird:

a) Representação Proposicional – pode ser entendida como uma generalização de uma ideia mais ampla, portanto, compreender uma proposição é saber como uma determinada situação deveria ser na essência. Se considerarmos todas as formas possíveis que o mundo possa ter, além de como ele é realmente, ou seja, o conjunto de todos os "mundos possíveis", então, uma proposição deveria ser verdadeira ou falsa para cada um dos membros do conjunto. Já a representação do tipo modelo proposicional, embora implique na utilização de regras, difere da anterior por ser articulada, interrelacionada e possibilitar a explicação de fenômenos, bem como extrapolar para novas situações.

b) Modelo Mental - compreende o construto psicológico do sujeito ao interagir com pessoas, com o meio ou qualquer artefato tecnológico, e dessa interação poder predizer tais comportamentos em futuras interações e relações. Pode ser entendido como uma representação de um objeto ou uma ideia, ou ainda de um evento qualquer. De acordo com Johnson-Laird (1983), é possível diferenciar modelos mentais de representações mentais em termos de diferentes critérios. Um desses critérios diz respeito à função: uma representação proposicional é uma descrição que pode ser verdadeira ou falsa em relação ao mundo. Os seres humanos não apreendem diretamente o mundo, mas têm uma representação interna dele. Além da função, existem diferenças entre modelos mentais e representações proposicionais quanto à forma. Um modelo representa um estado de coisas e conseqüentemente sua estrutura é contingente, tal como é a de uma representação proposicional ou analógico direto.

c) Imagens – são correlatos perceptivos dos modelos sobre determinado ponto de vista. Correspondem a uma visão do objeto ou evento representado no modelo.

As imagens e os modelos têm a propriedade de arbitrariedade. Nesse sentido, não podemos formar uma imagem geral de um objeto, mas podemos formar uma imagem específica. Se partirmos de uma série de informações incertas, das quais não se pode extrair nenhuma inferência profunda, pode ser mais econômico pensarmos nas proposições feitas, sem interpretá-las na forma de modelos. As proposições são representações de significados, verbalmente expressáveis, o que o difere Johnson-Laird de outros psicólogos cognitivos que consideram as proposições entidades individuais e abstratas formuladas apenas em linguagem própria da mente

Resumidamente, Jonhson-Laird (1983, p. 165) propõe que *"representações proposicionais* são cadeias de símbolos que correspondem à linguagem natural; *modelos mentais* são análogos estruturais do mundo e *imagens* correlatos perceptivos dos modelos sob um particular ponto de vista". Construir um modelo mental, segundo o autor, implica em: 1. traduzir os elementos de um sistema da realidade em código próprio, em função de nossos interesses; 2. utilizar um processo de inferência; 3. executar o modelo, ou por em funcionamento na mente, um processo de simulação qualitativa do funcionamento do sistema exterior que está sendo modelado.

Carrol e Olson (1988 apud BORGES, 1997) definem modelo mental como uma estrutura rica e elaborada que reflete a compreensão que o usuário tem do sistema, como ele funciona e por que funciona assim, permitindo ao usuário experimentar ações mentalmente, fazendo uso da imaginação, antes de executá-las.

Nessa perspectiva, o discurso pode ser de mundos fictícios ou imaginários, e daí nossa propensão para interpretá-lo pela construção de modelos dos estados de coisas, porque nos libera das 'algemas' da realidade perceptiva. Os indivíduos operam cognitivamente com modelos mentais, os quais podem ser construídos a partir da percepção ou do discurso. Podem ser constituídos por muitas proposições e regras articuladas, ou podem ser formados essencialmente por imagens, ou uma combinação de proposições ou imagens.

Modelos mentais são

> [...] representações analógicas um tanto quanto abstraídas de conceitos, objetos ou eventos que são espacial e temporalmente análogos a impressões sensoriais, mas que podem ser vistos de qualquer ângulo (e aí temos imagens!) e que, em geral, não retêm aspectos distintivos de uma dada instância de um objeto ou evento. (STERNBERG, 1996, p. 181).

Por exemplo, consideremos a situação “o quadro está na parede”. Tal ideia poderia ser representada mentalmente como uma proposição (porque é verbalmente expressável), como um modelo mental (de qualquer quadro em qualquer parede, possivelmente prototípicos) ou como uma imagem (de um quadro em particular em determinada parede).

Um modelo mental é uma representação que pode ser totalmente analógica ou parcialmente analógica e parcialmente proposicional (EISENCK; KEANE, 1994). Ou seja, um modelo mental pode conter proposições, mas estas podem existir como representação mental, no sentido de Johnson-Laird, sem fazer parte de um modelo mental. Contudo, para ele as representações proposicionais são interpretadas em relação a modelos mentais: uma proposição é verdadeira ou falsa em relação a um modelo mental de um estado de coisas do mundo. As imagens por sua vez, correspondem às vistas dos modelos, portanto, na perspectiva de Johnson-Laird (1983), representações proposicionais são cadeias de símbolos que correspondem à linguagem natural. Modelos mentais são análogos estruturais do mundo e imagens, são modelos vistos de um determinado ponto de vista.

De acordo com a tipologia de Johnson-Laird (1983), tais modelos podem ser físicos ou conceituais, mas, em geral, são construídos a partir do discurso e este requer um modelo conceitual. Os modelos conceituais, por não terem os referenciais do mundo físico, exigem, mais do que os modelos físicos, um mecanismo de autorrevisão recursiva. Embora as diferentes tipologias se conectem entre si, o modelo espacial e imagens formam os constructos que explicitamente permeiam nossa investigação.

> [...] capacitam os indivíduos para realizarem inferências e predições, compreender os fenômenos, predizer os fenômenos, decidir que atitude tomar. [...] permitem utilizar a linguagem para criar representações compatíveis com as que derivam do conhecimento direto do mundo, e relacionam as palavras com o mundo por meio de conceitos e percepções (JOHNSON-LAIRD, 1983, p. 397).

Considerando que o ensino deva ser um processo de produção e circulação de sentidos e significados, o aluno nesse contexto deverá ser crítico, reflexivo, ativo e questionador. Portanto, as conexões que buscamos nos modelos mentais são consideradas aqui como forma de contribuir para uma reflexão significativa acerca das características e usos de modelos.

3.6 Modelos Mentais no Campo do Conhecimento Científico

As ideias antes discutidas compõem um vasto conjunto de definições e classificações sobre modelos mentais que fundamentam pesquisas de vários campos do conhecimento. Ao lado de outros aspectos, as contribuições de Johnson-Laird (1983) conduziram a vários estudos onde são requeridas descrições e interpretações de fenômenos das áreas científicas. No âmbito das ciências da natureza vários pesquisadores têm dedicado seus estudos aos modelos mentais.

Desde a década de noventa do século passado, as pesquisas sobre modelos mentais vêm ganhando espaço significativo nos debates que visam melhorar o ensino das ciências. Nessa perspectiva de estudo, Krapas, Alves e Carvalho (2000) afirmam que a construção de modelos mentais e/ou representações mentais permite, sem avançar na direção da abertura epistemológica, de maneira prática, representar um objeto ou uma situação qualquer. São compostos de elementos e relações que representam um estado de coisas específico, estruturados de uma maneira adequada ao processo sobre o qual deverão operar. Os autores afirmam que uma pesquisa por eles realizada na literatura internacional de Educação em Ciências, revelou que no período de 1986 a 1995 a referência a modelos mentais representou uma constante, já no ano de 1995, teve um salto quantitativo bastante significativo. No Brasil, Greca e Moreira (1996, 2002), também conduziram investigações acerca dos modelos mentais de estudantes, apontando sua importância para a compreensão dos modelos físicos. Embora os autores afirmem que muitas expressões como: ideias alternativas, concepções prévias, concepções intuitivas, muito utilizadas na década de 80 para designar as ideias dos alunos ainda apareçam fortemente nas pesquisas, novos sentidos devam estar sendo atribuídos atualmente, para significar *modelo mental.*

O conceito de modelo mental é o de representação analógica que os indivíduos geram por meio de seus constructos cognitivos e tem como característica especial a capacidade de preservar a estrutura do objeto ou evento que supostamente representa.

> Modelos Mentais são representações dinâmicas e generativas que podem ser manipuladas mentalmente para prover explicações causais de fenômenos físicos e fazer previsões sobre estados de coisas do mundo físico. Supõe-se que muitos modelos mentais são criados na hora para resolver questões de situações problemáticas específicas. Contudo, é possível que alguns modelos mentais, ou parte deles, que foram úteis uma vez, sejam armazenados como estruturas separadas e recuperados da memória de longo prazo quando necessário (VOSNISDOU, 1992, p. 48).

No campo do conhecimento químico, argumenta Johnstone (1991), não é possível perceber os fenômenos diretamente. Quando falamos de elemento ou composto, não podemos perceber claramente as ideias dos estudantes, visto que eles não possuem experiências prévias que facilitem tais interpretações. Para fazer inferências sobre o que o aluno aprende e o que se ensina, Galagovski, et al. (2003) apresentam um modelo proposto por Johnstone (1997) que mostra algumas premissas sobre as formas como os conhecimentos anteriores condicionam os novos conhecimentos.

a) As percepções que registramos através dos sentidos não são objetivas, são filtradas e interpretadas de forma idiossincrática;
b) O que já sabemos, o que está guardado em nosso banco de memória à longo prazo, é o que controla a significação que damos a novas informações sensoriais que recebemos, ou seja, condiciona o nosso filtro perceptivo;
c) Nossa memória de trabalho é a parte de nossa atividade mental que, conscientemente, presta atenção a uma dada situação e pensa sobre ela. É a que se fixa na percepção que temos de algo, e procura dar-lhe um sentido;
d) Dar sentido a algo é colocá-lo, agregá-lo a algo já conhecido ou a algo em que se crê.
e) A memória de trabalho tem duas funções: uma de sustentar momentaneamente a informação, no foco da atenção - na memória de curto prazo – e a outra é dar um formato a essa informação para guardá-la, utilizá-la, ou se for o caso, descartá-la. Esta memória de trabalho tem uma capacidade limitada, saturando-se se a quantidade de informação recebida é grande ou se seu processamento é muito complicado;
f) Uma informação que satura ou sobrepassa a capacidade de memória de trabalho de um sujeito, não poderia ser processada por ele.

As autoras argumentam que, em vários contextos didáticos, principalmente no contexto dos conhecimentos químicos, há uma distância entre o que se ensina e o que realmente o aluno apreende. Nessa perspectiva, se o aluno interage pela primeira vez com conceitos químicos (entes abstratos mediados por interpretações simbólicas), seus sentidos não permitirão que apreenda mediante a percepção direta. Diante de tal situação, os professores apelam para as analogias, metáforas, desenhos, experiências de laboratório, além das leis, teorias, regras, definições e, mesmo assim, estes recursos acabam provocando aprendizagem mnemônica, fragmentada e, muitas vezes, sem sentido.

De maneira geral, modelos mentais são interpretados como um conjunto de objetos autônomos "conectados". Para ilustrar essa situação, Lagreca (2006), citando Williams, Hollan e Stevens (1983), diz que uma "região de fluido" pode funcionar como um objeto autônomo em um modelo e ter como parâmetro a temperatura, a qual pode assumir um de quatro valores (aumentando, diminuindo, constante, indeterminada). Este objeto está conectado explicitamente com um número limitado de outros objetos, e interage com eles transmitindo mudanças nos valores de seus parâmetros através do que os autores chamam de "portos" (conexões mentais entre os objetos autônomos que compõem o modelo mental). Assim, o modelo mental de um "trocador de calor" pode incluir um objeto autônomo, que representa o mecanismo de transferência de energia térmica a vários outros objetos autônomos, que representam "regiões de fluido". Na essência, o que se pode inferir sobre o fenômeno é que alguns destes objetos estão conectados ao correspondente mecanismo de transferência, e somente eles poderão passar adiante que houve uma mudança nos parâmetros de certa região de fluido. Os objetos autônomos desses autores, possivelmente são objetos mentais que poderiam ser identificados como modelos mentais com fronteiras definidas. Nesse sentido, esses objetos normalmente se apresentam com certa opacidade e, no entanto, podem em algumas situações formar um novo modelo mental que poderia ser usado para produzir explicações acerca do comportamento do objeto autônomo.

Greca e Moreira (1996, 1997) também investigaram o tipo de representação mental usado por estudantes universitários da disciplina de Física Geral, sobre o conceito de campo no domínio do eletromagnetismo. O estudo foi realizado em dois semestres consecutivos, fundamentado pela teoria de Johnson-Laird, sobre os três tipos de representação mental: modelo mental, proposição e imagem. A questão de pesquisa proposta pelos autores tinha como objetivo identificar se os alunos operavam mentalmente com modelos, proposições ou imagens, ou alguma combinação dos tipos de representações.

Nersessian (2007) enfatiza a importância do uso de modelos na solução de certos problemas científicos. A construção e manipulação de modelos mentais são úteis tanto para situações experimentais como teóricas e se colocam como mediadores entre o fenômeno e a linguagem (incluindo a matemática).

Um dos estudos de Nersessian (2007) compõe um vasto registro escrito, da memória de vários cientistas, dentre eles, Galileu, Maxwell, Newton, Bohr, etc. mostrando os processos criativos e as representações utilizadas por esses cientistas, no processo de criação. Para este estudo Nersessian (2007) considerou: o raciocínio analógico; o raciocínio por meio de imagens e experimentos mentais. Estes três instrumentos são processos de modelização

muito importantes, principalmente, nas situações de mudança conceitual radical, e que foram esquecidos, o que acabou reduzindo o método científico a processos meramente dedutivos e indutivos.

Como exemplos de raciocínio analógico, a autora menciona algumas analogias que foram importantes na elaboração do novo conceito científico: a analogia de Newton (movimento de projéteis e da lua que culminou na lei da gravitação universal); a analogia de Darwin (a criança e reprodução seletiva na natureza que deu origem à seleção natural); a analogia de Bohr-Rutherford (a estrutura do sistema solar e a estrutura atômica).

O raciocínio por meio de imagens também tem importância nos estudos de Nersessian (2007), visto que de acordo com a autora, tais imagens ajudam significativamente a organizar a atividade cognitiva, no processo de raciocínio. Elas participam dos fenômenos de modelização de diversas maneiras, por exemplo, representações visuais como as utilizadas por Maxwell para modelar analogicamente a natureza eletromagnética ou as linhas visuais traçadas por Faraday para descobrir o efeito de forças que o ímã produz no entorno (linhas de forças). Dessa forma, constituem elementos fundamentais na construção de modelos mentais pela comunidade científica, bem como a extrapolação de tais modelos para outras situações.

Nersessian (2007) aborda experimentos mentais e discute que diferentemente dos modelos mentais, tais experimentos lidam com representações dinâmicas, como as simulações imaginárias. Para casos especiais de experimentos mentais, diz Nersessian (2007, p. 568), “a simulação consiste em abstrair dimensões físicas específicas para criar uma representação idealizada, tal como a queda de corpos no vazio. O isolamento do sistema físico na mente nos permite manipular variáveis, além do que é possível, fisicamente”.

Um aspecto importante da construção de modelos mentais é que os elementos da realidade devem ser traduzidos em códigos que tenham significados para os sujeitos. Esses códigos, portanto, constituem-se como dados à luz dos modelos científicos, sobre os quais os detalhes eventualmente significativos traduzem-se em explicações consistentes para os modelos representativos de fenômenos mais complexos. Nessa perspectiva, Lagreca (2006) afirma que a percepção do mundo se dá por meio de modelos, portanto, somos capazes de antecipar até eventos remotos fazendo inferências do que percebemos ou falamos.

Lagreca (2006) considera que uma das características essenciais de um modelo mental é sua funcionalidade. Um modelo mental é uma representação de alto nível que, de um ponto de vista funcional, numa notação simbólica arbitrária, corresponde a um aspecto do mundo real ou imaginário. Greca e Moreira (1996) consideram que os modelos mentais são

formas de representação analógica do conhecimento, assim, entidades e relações presentes em um modelo determinado e aquilo que se pretende representar.

É fundamental notar que na perspectiva de ensino que estamos propondo, fica clara a necessidade de valorizar as representações e os modelos mentais dos estudantes. Isso nos leva a refletir sobre a questão de como lidar com esses construtos, para irmos além de considerações dispersas. É uma questão que exige muita reflexão, e se buscarmos fundamentar objetivamente o pensamento científico, entraremos necessariamente nas inevitáveis formulações matemáticas, e dependendo da ênfase dada nessa perspectiva, os estudantes perdem a possibilidade de utilizar o conhecimento construído para interpretar o mundo exterior que está à sua volta. Não se trata, contudo, de desconsiderar a importância de tais formulações. Pietrocola (2004) nos lembra que a matematização das ciências naturais deu-se como fruto de um longo processo de mútua adaptação entre fenômenos e a própria Matemática. Aos poucos, diz o autor, ela se impôs como meio necessário à formulação de novas ideias sobre o mundo natural e por volta do final do século XVII, o potencial estruturado da Matemática revelou-se por completo nas teorias Mecânicas de Galileu, Kepler e Newton, contribuindo para a fundação daquilo que se passou a chamar Ciência Moderna.

Ainda sobre as formulações matemáticas, o autor diz que antes da matemática existem as ideias e, nesse sentido, a importância dessa área do conhecimento reside em dar forma às ideias, auxiliando o pensamento a apropriar-se e a utilizar-se delas. O domínio de seus conteúdos não garante a apropriação de ideias científicas e tampouco articulação e relação com o mundo dos fenômenos. Nas áreas das ciências exatas, em especial a Física e a Química, as fórmulas precedem as ideias, e em algumas situações, os educadores relegam as ideias ao segundo plano. As ideias neste contexto constituem-se o objeto fundamental de acesso à evolução histórica, que vai significar o conhecimento científico considerado. Ignorar as ideias implica "surdas batalhas" entre, de um lado o professor, que muitas vezes, sem sucesso, apela para a matematização e, de outro, os alunos que tentam ver sentidos nessas aulas que conflitam com suas ideias.

Parece não haver dúvidas de que o aluno deva dispor de um conjunto articulado e cada vez mais amplo de recursos expressivos para aplicá-los, ao tentar compreender um evento ou uma situação nova em termos de coisas que nos são familiares, por exemplo, através de analogias. Portanto, o interesse por modelos mentais e analogias se deve à aceitação da ideia de que aprendemos o novo em função do que já conhecemos. Quando dizemos que um objeto é análogo a outro, significa que uma comparação entre seus

componentes estruturais já foi feita, então, a analogia passa a ser o veículo que expressa os resultados de tal comparação.

Às instituições de ensino cabe constituir-se como espaço de confronto de sentidos, por excelência. O professor, em lugar de silenciar em relação aos termos usados pelos alunos, deve se posicionar como mediador, aquele que questiona, que provoca reflexões, que gera contestações, que solicita a argumentação, que possibilita novas situações e provoca desacordos e confrontos intelectuais. Assim, poderá fazer uso das representações mentais, sem cair na falácia da aceitação passiva e comprometedora que os modelos e as analogias, em algumas circunstâncias, impõem.

Pensar envolve a criação e a apropriação de modelos que representam a realidade. Contudo, é fundamental entender que a compreensão de tais modelos implica lidar com limitações e pressupostos que mudam de acordo com as diferentes comunidades de educadores que os utilizam. Considerando os aspectos cognitivos, os modelos mentais são usados para caracterizar as formas pelas quais as pessoas compreendem os sistemas físicos com os quais interagem. De acordo com Borges (2000), os modelos mentais servem para explicar o comportamento de um sistema, fazer previsões, identificar falhas e atribuir causalidade aos eventos e fenômenos observados. Muitos outros empregos podem ser encontrados em diversas áreas do conhecimento, no entanto, vamos abordar apenas os de interesse cognitivo.

Conforme Paty (2002, p. 2), a "racionalidade científica, com base na matemática passa a ser vista como uma forma refinada de estabelecermos essa cadeia de relações e isso nos obriga a considerar que o sentido físico é indissociável de sua forma matemática". Apesar do valor inegável da matematização do saber científico ao valorizar a elaboração do conhecimento rigoroso, por meio dos modelos clássicos, muitas vezes se desconsideram os indícios mínimos que podem ser reveladores de fenômenos mais gerais. Além disso, muitos professores, ao lidarem com os conhecimentos científicos, desconsideram que o rigor científico do paradigma galileano é indesejável para as disciplinas que elegem como seu objeto a experiência cotidiana. Nesse sentido, entendemos que é indispensável lidar com as formulações matemáticas, no entanto, entendemos também que se o professor não explorar os modelos que os alunos possuem ou constroem acerca dos fenômenos considerados abstratos, dificilmente os conhecimentos inerentes a tais fenômenos poderão ter significados em situações cotidianas.

Estas ponderações levaram-nos, contudo, a buscar alguns elementos que consideramos essenciais nas experiências mentais, e é sobre elas que nos deteremos a seguir.

4 EXPERIMENTOS MENTAIS

4.1 Experiências e Experimentos: Algumas Considerações

Inicialmente, abordamos algumas características relacionadas às experiências para identificar elementos incorporados ao debate, ainda hoje difundido, sobre verdade científica, que se reflete no cientificismo típico de nossa cultura ocidental. Não é nosso intuito buscar os principais relatos que caracterizam as duas expressões, mas retomar alguns aspectos que identificam os tipos de experiências e as diferenciam dos experimentos.

Apesar de o apelo à experiência[4] ter sua origem nos primeiros sofistas e sempre atrelada à necessidade de exploração dos sentidos, em fins do século XVI e no início do século XVII, a noção de *experiência* ganha autoridade antes inimaginável e faz da dimensão empírica uma característica distintiva da ciência moderna. Diversas críticas a essa ideia surgiram nesse período, e uma das mais célebres, conforme Oliveira (2002) foi a de Koyré, para quem a matematização era a principal característica na perspectiva da ciência moderna. A experimentação ou era irrelevante ou poderia até atrapalhar a nova visão de mundo. Bacon também foi um crítico da experiência que exaltava os sentidos como única forma de ver o mundo. Seu pensamento se diferenciava dos empiristas anteriores, por defender uma forma organizada, rigorosa de obter dados, seguir o método da indução e elaborar o conhecimento científico.

As considerações de Koyré, de acordo com Oliveira (2002), são válidas para alguns campos do conhecimento científico, enquanto que, para outros campos da ciência moderna, a dimensão experimental foi e continua sendo fundamental. Nesse sentido, afirma o autor, a Química, a Anatomia, a História Natural e outras Ciências não poderiam ser desenvolvidas sem a experiência.

Um primeiro tipo de experiência que podemos considerar, pautado na tradição da Antiguidade e da Idade Moderna, explica Oliveira (2002), refere-se às experiências que exemplificam e ilustram as teorias. Tais experiências não se configuravam como argumentos

[4] Dicionário de Filosofia, Mora (2001, p. 263): "O termo experiência é empregado em vários sentidos e suas concepções são bastante numerosas: (a) a experiência como confirmação ou possibilidade de confirmação empírica (e com freqüência sensível) de dados, (b) a experiência como fato de viver algo dado anteriormente a toda reflexão ou predicação (c) experiência usada como conceito fundamental metafísico ou como conceito prévio a todos os outros. (d) a experiência em Aristóteles fica melhor integrada no seio da estrutura do conhecimento. É a apreensão do singular e sem esta apreensão não haveria possibilidade de ciência [...]".

legítimos das proposições científicas ou leis universais. Por se tratarem de experiências comuns, seus dados eram obtidos do cotidiano, sem o uso de instrumentalização. Assim, seus resultados permitiam "[...] fundamentar uma argumentação ou exemplificar uma teoria, sem uma experimentação ou mesmo uma nova observação" (OLIVEIRA, 2002, p. 155).

Ainda no escopo da ciência moderna identifica-se um segundo tipo de experiência. As observações e as experiências não se efetuam no plano do cotidiano e das coisas visíveis, e sim pela via dos experimentos mentais, que visam encontrar respostas para determinadas dúvidas colocadas pela teoria. "São frutos de uma interrogação metódica que pressupõe uma linguagem especial em que se formulam perguntas e se interpretam as respostas" (OLIVEIRA, 2002, p. 155). Para o autor, temos, no primeiro tipo, possibilidades de reconstruções mentais, enquanto que, no segundo, os experimentos mentais referem-se a situações idealizadas, que dispensam a utilização de instrumentos, porém não dispensam sua idealização.

O terceiro tipo de experiência, o exploratório, também se diferencia do primeiro em relação ao cotidiano. Caracteriza-se por experimentações metódicas e concretas e não apenas imaginadas. Não se trata, nesse caso, de verificar ou demonstrar teorias já existentes, mas de buscar outras observações de comportamento da natureza em condições não identificadas anteriormente, ou até mesmo em condições inexistentes.

Oliveira (2002, p. 157) entende que, diferentemente do primeiro tipo, o segundo e o terceiro não são simples *experiências,* mas *experimentos*. "Tanto os experimentos mentais como os exploratórios concebem como revelador aquilo que está fora da percepção ordinária e produzem os fenômenos e objetos que desejam observar".

4.2 Experimentos Mentais: Contextos Históricos

A concepção epistemológica de Thomas Khun, aceita por grande parcela dos estudiosos de Filosofia da Ciência, propõe-se a descrever os processos pelos quais ocorrem as transformações de pensamento científico dominante em cada época, consagrado no termo clássico de *paradigma*. Vale destacar, todavia, que, embora o autor não use a expressão 'paradigma' em seus ensaios sobre experiências mentais, o sentido é o mesmo. Em sua obra clássica e famosa *A Estrutura das Revoluções Científicas*, o autor descreve diversos momentos da Ciência, em que ele localiza crises e revoluções, mas, talvez, o exemplo mais

significativo seja a passagem do pensamento aristotélico para o pensamento galileano de mundo e de comportamento dos corpos em movimento. Essas considerações deixam claro que se trata de uma significativa ruptura conceitual, uma vez que a concepção aristotélica sobre o movimento dos corpos permaneceu por mais de dois mil anos, vindo a sofrer mudanças radicais somente com o advento do pensamento de Galileu.

As regularidades e as uniformidades observadas com a finalidade de traçar um conjunto de leis gerais deram lugar, nesta nova ordem científica, às diferenças, às especificidades e aos detalhes, portanto, a um movimento de relativização das verdades científicas. Nesse sentido, um problema que induz a uma crise na estrutura de um experimento mental ajuda-nos a entender as explicações acerca dos fenômenos por outra perspectiva, reconceitualizada. Consolida-se, assim, uma nova forma de entender o mundo real, segundo a qual um dos critérios de veracidade passa a ser a experimentação, matematicamente controlada.

Uma mudança radical se coloca frente à visão de mundo, constituída da observação própria da física aristotélica para uma nova forma de ver os fenômenos físicos, baseada na experimentação e nas leis matemáticas. Dito de uma forma bastante resumida, a ciência moderna passa a ser baseada na observação, na experimentação e na construção de modelos que expliquem a realidade. Nesse contexto, muda a gênese do pensamento aristotélico sobre alguns conceitos. Compreender, então, a revolução científica do século XVII significa compreender que as ideias e conceitos, ao longo da história, podem ser questionados, dando lugar a uma nova teoria.

Em que pesem a importância histórica, epistemológica e metodológica da experimentação no trabalho de Galileu, não foi somente no mundo físico que o pensador italiano encontrou argumentos que o auxiliaram a impor suas ideias sobre as de Aristóteles. No mundo da mente, ele encontrou um campo extraordinariamente fértil para a condução de experimentos controlados e conclusivos. Montados e conduzidos apenas no laboratório do cérebro, estes “experimentos mentais” contribuíram fortemente para ressaltar os paradoxos de uma ciência física milenar e abalar irremediavelmente seus alicerces.

Modernamente, os experimentos mentais têm merecido um número cada vez maior de estudos e publicações, mostrando que o processo de “experimentar com a mente” ganha significado crescente e constitui, essencialmente, uma estratégia que possibilita a familiarização com o sentido histórico da ciência e seus métodos. Nessa perspectiva, os aspectos epistemológicos e práticos desempenham um papel estratégico nas conexões com as diferentes áreas do conhecimento.

Do ponto de vista teórico, julgamos que o tema deste trabalho possibilita abordagens mais específicas, que articulem as questões epistemológicas das experiências conduzidas apenas em pensamento e a Educação em Ciências. Apoiamo-nos, contudo, em aspectos mais abrangentes que remetem às diferentes concepções e finalidades dos Experimentos Mentais.

Em várias publicações que têm os experimentos mentais como foco, os autores destacam exemplos com base em diversos pensadores que foram fundamentais na história do pensamento humano. Assim, dificilmente falamos nestes experimentos sem buscar os principais desdobramentos das ideias dos principais historiadores e filósofos da ciência. Nosso intuito não é expor o conjunto delas sobre o que constitui e diferencia o pensamento aristotélico e o pensamento galileano, mas, de maneira sumária, ressaltar a importância da experimentação pensada para o ensino e, inevitavelmente, os principais pensadores que fizeram uso de tais experiências.

Essa modalidade de raciocínio sempre mostrou exercer um papel fundamental nos processos de transformação do pensamento científico e não são poucos os pesquisadores que destacam sua importância como ferramenta didática decisivamente válida nos processos de ensino/aprendizagem.

Conforme já foi dito, Galileu explorou bem essa linha de raciocínio e acabou por colocar em evidência um dos paradoxos do modelo aristotélico de explicação da queda dos corpos. O rigor e a elegância de seu raciocínio podem ser apreciados em sua obra monumental *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Sulle due Nuove Sciene (Discursos e Demonstrações Matemáticas Sobre Duas Novas Ciências.*

A fim de melhor ilustrar tal linha de raciocínio, vejamos um pouco da história do modelo grego sobre o movimento e, após, trechos da obra de Galileu.

4.2.1 O pensamento de Aristóteles

Surgido num período de exuberância filosófica da Grécia Antiga, o modelo cosmológico e do movimento dos corpos de Aristóteles só foi superado cerca de 2000 anos após sua teorização. Vejamos, de modo simplificado, duas concepções que cercavam seu pensamento.

A primeira delas diz respeito à estrutura do Universo. Aristóteles imaginava um mundo *fechado*, no qual a Terra, imóvel, localizava-se no centro do Universo e era circundada por esferas rígidas e concêntricas de cristal, que executavam movimentos circulares ao seu redor. Sobre as esferas estariam engastados os planetas e demais corpos celestes a partir da Lua. Seria, então, o movimento das esferas que justificaria o movimento dos corpos celestes. Assim, no pensamento de Aristóteles não poderia haver movimento em torno de outros corpos celestes, mas apenas em torno da Terra. Tal movimento circular seria o movimento perfeito, porque era inerente aos corpos perfeitos, compostos por *éter* celestial, elemento considerado perfeito.

Uma segunda concepção interessante a ser analisada, diz respeito ao movimento dos corpos na Terra (ou mais especificamente, abaixo da Lua). Na visão de Aristóteles, existiam apenas dois tipos de movimento natural: o movimento vertical para baixo (isto é, em direção a Terra ou ao seu centro) e o movimento vertical para cima (sentido oposto ao anterior). Qualquer outro tipo de movimento seria, no mundo sublunar, um movimento não natural e, portanto, violento. Essa classe de movimento, segundo Aristóteles, era constituída por forças que empurram ou puxam os corpos. A característica principal desse movimento era a presença de uma força externa que puxa ou empurra um objeto qualquer (que não se move por si próprio).

Por que razão os corpos caem (tal como a terra e a água) ou sobem (tal como o fogo e o ar)? A resposta que Aristóteles dava à questão estava baseada na hipótese das *qualidades* que esses corpos apresentam de serem pesados (graves) ou leves. Os corpos caem ou sobem por terem as *qualidades* inerentes de serem pesados ou leves. Assim, levando em conta os fundamentos teleológicos do pensamento aristotélico, os corpos caem em direção à Terra por ser este seu "lugar natural".

Para Aristóteles, o universo era constituído de cinco elementos: água, ar, fogo, terra e éter, cada um deles com um lugar próprio, denominado de "lugar natural". Os quatro primeiros seriam responsáveis por tudo que existe no nosso mundo e o quinto existiria apenas no céu, responsável por constituir estrelas e planetas e preencher todo o espaço. A Terra estaria no centro do universo, em seguida, teríamos a água e, acima dela, o ar e, depois, o fogo (OLIVEIRA, 2002).

Na concepção aristotélica, quanto mais pesado fosse um corpo, mais rápido ele cairia e, quanto mais leve, mais facilmente ele ascenderia aos céus. Tal hipótese justificava a terra como elemento mais "abaixo" dos demais, seguida pela água. Também justificava porque o fogo sobe mais facilmente ao céu, seguido pelo ar. A idéia de que um corpo cai ou

ascende aos céus por suas *qualidades* está no foco da revolução científica, ocorrida no século XVII, como se verá mais à frente. Resumidamente, para Aristóteles todos os movimentos eram devido ao objeto movente (movimento natural), ou a algum puxão ou empurrão (movimento violento). Essa precipitada conclusão de Aristóteles, resultado de uma elaboração mental apenas, perdurou e dominou o pensamento científico-filosófico por quase dois mil anos, até que Galileu com suas experiências irrefutáveis provou ser falsa a teoria aristotélica.

4.2.2 As argumentações de Galileu

Uma extraordinária mudança na forma de se pensar o mundo foi desencadeada no início do século XVI. Apoiado em cálculos matemáticos, mais do que em observações, Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs o modelo heliocêntrico de mundo, em franca discordância com o pensamento aristotélico-tomista. Mais agressiva (herética, segundo o catolicismo), seria a proposta de Giordano Bruno (1548-1600) de que, se a Terra não estivesse no centro do Universo, mas sim o Sol, porque, afinal, não se pensar em um Universo Infinito e desprovido de centro? Tal hipótese custou a vida de Bruno, queimado na fogueira da Santa Inquisição.

Chega-se, por fim, à figura de Galileu Galilei. Nascido em 1564, na cidade de Pisa, então sob o domínio de Florença, Galileu apoia-se nos trabalhos de Copérnico, Bruno e Johannes Kepler e propõe ideias que destruíam totalmente o mundo *fechado* de Aristóteles em nome de um *Universo Infinito*, em que os movimentos teriam explicações matemáticas *quantificáveis* e não mais se justificariam pelas *qualidades*.

Fazendo uso do telescópio, adaptado da luneta inventada pelos holandeses, Galileu viu um céu impuro, com a superfície da Lua fustigada por marcas grosseiras, viu manchas no Sol e viu ainda luas naturais, orbitando ao redor do planeta Júpiter. Estava desfeita a perfeição dos céus, e Galileu propunha a destruição dos mais caros dogmas da Igreja Católica.

Quanto aos movimentos, mais do que explicar porque os corpos caem ou sobem, Galileu explicou como eles o fazem, enxergando relações matemáticas em seu comportamento.

Condenado pelo tribunal eclesiástico à prisão domiciliar após ter abjurado de suas ideias, mas irremediavelmente desprovido da visão, Galileu prosseguiu secretamente em suas

investigações e publicou, em 1638, os *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Sulle Due Nuove Scienze* (Discursos e Demonstrações Matemáticas sobre Duas Novas Ciências). Escrito na forma de diálogo, estilo comum na divulgação de resultados científicos da época, o livro contempla um embate entre três personagens não inteiramente fictícios. Salviati, nobre florentino (adepto do modelo galileano, representa o próprio Galileu), Simplício, filósofo grego (um dos últimos representantes da escola neoplatônica, representa o interlocutor que sustenta as posições aristotélicas e ptolomeicas) e Sagredo, que, além de exercer atividades governamentais e diplomáticas, teve grande interesse pelas questões científicas de sua época. Na obra, Sagredo atua como mediador em um diálogo entre os dois primeiros debatedores.

Retomando uma das concepções do modelo de Aristóteles, o filósofo grego afirmava que uns corpos caem mais rápido do que outros em virtude da *qualidade* dos primeiros serem mais pesados (ou graves) do que os últimos. Galileu ataca este modelo apenas por meio do raciocínio e convida seus personagens interlocutores à condução de um experimento que se sucede apenas na mente. Trechos dos *Discorsi* ilustram bem esse momento. Buscamos, na primeira jornada dessa obra, alguns exemplos que contém, em certa medida, uma crítica aos princípios fundamentais da Física aristotélica, especificamente sobre movimento. Além disso, o diálogo a seguir evidencia a importância que se dava aos experimentos, fossem eles, mentais ou físicos.

> **Salviati** – *[...] duvido seriamente que Aristóteles jamais tenha verificado experimentalmente se é verdade que duas pedras, das quais uma pesa dez vezes mais, soltas no mesmo instante de uma altura de, por exemplo, cem braças, têm velocidades tão diferentes que, no momento em que a mais pesada chegasse ao chão, a outra não teria percorrido nem dez braças.*
> **Simplício** – *Verificamos segundo suas próprias palavras que ele fez a experiência, pois ele diz: 'vemos o mais pesado', ora, esse 'ver' alude a uma experiência efetuada.*
> **Sagredo** – *Mas eu, Senhor Simplício, que não fiz a prova, asseguro-lhe que uma bala de canhão que pesa cem, duzentas ou mais libras, não precederá nem de um palmo a chegada ao solo, de uma bala de mosquete de meia libra, mesmo que a altura de queda seja de duzentas braças.*
> **Salviati** – *Sem recorrer a outras experiências, podemos provar claramente, por uma demonstração breve e concludente, que não é verdade que um móvel mais pesado se move com maior velocidade que outro menos pesado, entendendo que ambos sejam da mesma matéria, como é o caso daqueles de que fala Aristóteles. Porém, diga-me, Sr. Simplício, se admite que a cada corpo pesado em queda corresponda uma velocidade naturalmente determinada, de modo que não se possa aumentá-la ou diminuí-la a não ser usando violência ou opondo-lhe alguma resistência.*
> **Simplício** - *Não se pode duvidar que o mesmo móvel no mesmo meio tem uma velocidade fixada e determinada pela natureza, que não pode ser aumentada a não ser acrescentando-lhe um novo ímpeto, nem diminuída, salvo por algum impedimento que o retarde.*

Conforme se observa no diálogo acima, Simplício defende a idéia aristotélica de que corpos mais pesados caem com velocidade maior do que corpos mais leves. Nesta obra Salviati (representando o próprio Galileu) destrói metodicamente os argumentos tradicionais expressos por Simplício. Discordante dessa idéia, Salviati busca, pela argumentação, novas explicações com o intuito de convencer seus interlocutores, como se pode perceber na sequência a seguir.

> **Salviati** – *Se tivéssemos, portanto, dois móveis, cujas velocidades naturais são desiguais, é evidente que, se uníssemos o mais lento com o mais rápido, este último seria parcialmente retardado e o mais lento aumentaria em parte sua velocidade, devido ao mais veloz. Não concorda com minha opinião?*

Neste ponto, Salviati expõe os resultados esperados para a queda dos corpos, considerando dois corpos de pesos diferentes unidos. Simplício concorda com esse argumento, como se pode depreender da fala seguinte.

> **Simplício** – *Parece-me que assim é indubitavelmente.*
> **Salviati** – *Porém, se é assim e se é também verdade que uma grande pedra se move, por exemplo, com uma velocidade de oito graus, e uma menor com uma velocidade de quatro graus, então, unindo-as, o composto se moverá com uma velocidade menor que oito graus. Contudo, as duas pedras juntas formam uma pedra maior que aquela que se movia com oito graus; do que se segue que este composto (que é maior que a primeira sozinha) se moverá mais lentamente que a primeira sozinha, que é menor; o que contradiz a sua suposição. Vemos, pois, que, supondo que o móvel mais pesado se move com maior velocidade que o menos pesado, concluo que o mais pesado se move com menor velocidade.*

É nesse momento que Salviati, usando a lógica aristotélica, mostra o paradoxo a que se chega para o caso da queda dos corpos.

> **Simplício** – *Estou completamente confuso, pois parece-me que a pedra menor, unida à maior, aumenta seu peso e, aumentando seu peso, não vejo como não deva aumentar-lhe também a velocidade ou, pelo menos, não diminuí-la.*

Simplício não compreende o porquê do paradoxo, e Salviati tenta uma nova explicação.

> **Salviati** – *Aqui, Sr. Simplício, comete outro erro, porque não é verdade que a pedra menor aumenta o peso da maior.*
> **Simplício** – *Oh! Eis algo que está além do meu entendimento!*
> **Salviati** – *Estará ao alcance do seu entendimento quando eu lhe mostrar o equívoco no qual está mergulhado; considere que é preciso distinguir os corpos pesados em movimento, dos mesmos corpos em repouso. Uma pedra grande colocada numa balança não apenas adquirirá um peso maior se lhe acrescentarmos outra pedra, mas mesmo o acréscimo de um pedaço de estopa aumentará seu peso em seis ou dez onças correspondente ao peso da estopa. Se, ao contrário, se deixa cair livremente a partir de uma altura uma pedra amarrada à uma estopa, acredita o senhor que no decorrer do movimento a estopa pesa sobre a pedra, acelerando assim sua queda, ou acredita ao contrário que ela retardará, sustentando-a em parte? [...] Conclua, portanto, que na queda livre e natural a pedra menor não pesa sobre a maior e, conseqüentemente, não lhes acrescenta peso algum, como o faz em repouso.*
> **Simplício** – *Mas e se colocássemos a pedra maior sobre a pedra menor?*

Neste momento, Salviati vai apresentar a Simplício, um novo modelo de explicação da queda de corpos, conforme as conclusões de Galileu.

> **Salviati** – *Aumentaria seu peso, se seu movimento fosse mais rápido, entretanto, já concluímos que, caso a menor caísse mais lentamente, reduziria em parte a velocidade da maior, de forma que juntas se moveriam com uma velocidade menor, apesar de juntas serem maiores que a pedra maior, o que vai contra a suposição inicial. Concluímos, portanto, que tanto os móveis grandes como os pequenos movem-se com uma mesma velocidade, se possuíssem o mesmo peso específico.*
> **Simplício** – *Seu raciocínio é realmente bem conduzido; todavia, parece-me difícil que uma gota de chumbo possa mover-se tão rapidamente quanto uma bala de canhão.*

Simplício reconhece a boa argumentação de Salviati, mas mostra-se incrédulo quanto às conclusões.

> **Salviati** – *[...] que essa seja, já que agrada ao Sr. Simplício, a solução da nossa dúvida e, abandonando a digressão, voltemos ao nosso propósito. [...]*

Nesta passagem, Salviati demonstra que o raciocínio com base na doutrina aristotélica de movimento conduz a uma conclusão errônea, visto que, se de fato corpos mais leves (L) caem com velocidade menor, então, a pedra mais leve, uma vez presa a um corpo mais pesado (P), vai retardar a queda desta, de modo que o sistema combinado deve ter

velocidade menor do que a pedra mais leve, individualmente, ($V_{L+P} < V_L$)[5]. Por outro lado, o sistema combinado é mais pesado do que somente esta última, logo, deve cair com velocidade maior do que a do corpo mais pesado, ou seja, ($V_{L+P} > V_P$). Chegamos, por esta forma, à conclusão absurda de que corpos pesados são ao mesmo tempo mais rápidos e mais lentos na queda do que sistemas combinados mais pesados.

Deste modo, por meio do uso do raciocínio lógico (herdado do pensamento aristotélico), Galileu destrói o próprio modelo do filósofo para os corpos em queda.

É notável a demonstração lógica e *puramente mental* do raciocínio de Galileu. A simplicidade e beleza desse experimento mostram-nos, de forma exemplar, o poder dos experimentos mentais. Sem se discutir se o experimento foi ou não executado, estamos diante de uma linha de raciocínio que destrói, por si só, uma concepção que havia perdurado por dois mil anos. Certamente, não foi apenas essa demonstração mental galileana que conduziu à derrocada do modelo de Aristóteles, entretanto, não há como negar o poderio epistemológico do experimento conduzido por Galileu na mente de seus personagens. Oliveira (2002, p. 155), afirma que o próprio Galileu admitiu, em diversas ocasiões, que "o poder da mente tornava redundante e dispensável a execução de alguns experimentos que descrevia".

Que características especiais têm a linha de raciocínio lógico acima conduzido que a torna tão poderosa?

Uma busca detalhada na literatura vai evidenciar um vasto conjunto de situações em que um experimento é operado apenas na mente e conduz a resultados interessantes e importantes. Tais experimentos mentais são capazes de derrubar teorias, reforçar ou expor as sutilezas e características de outras teorias, de elucidar divergências entre teorias rivais, simular fenômenos naturais, imaginar fenômenos, descobrir eventos e mais uma série de possibilidades. Frente às questões apontadas, cabe abordar alguns exemplos que elucidam as vantagens de lançar novos olhares para experimentos mentais. No interior dessa discussão e considerando as questões sobre a pertinência de tais experimentos, achamos adequado, neste momento, trazer alguns pressupostos acerca dos experimentos conduzidos pela mente e retomá-los, mais adiante, ainda neste capítulo. Antes, uma breve digressão sobre a nomenclatura que será adotada ao longo deste trabalho.

[5] Os termos V_L V_P indicam, respectivamente: velocidade do corpo mais leve e velocidade do corpo mais pesado.

4.3 Experimentos Mentais: Origem do Termo

Em 1897, o físico Ernst Mach adota o termo *gedankenexperiment* (consolidado como *thought experiment* na língua inglesa) para nomear uma conduta de investigação científica análoga aos procedimentos que deveriam ser utilizados pelos seus estudantes para realizar um experimento físico. Embora Mach tenha popularizado o termo, foi Hans Christian Oersterd[6], por volta de 1812, o primeiro a utilizar a mistura latim-alemão (*Gedankenexperiment*) e, por volta de 1820, o termo é totalmente apresentado na língua alemã (*Gedankenversuch*).

No século seguinte à sua descrição como método específico de questionamento, *Gedankenexperiment* aparecia esporadicamente na literatura de língua inglesa sobre Filosofia da Ciência, notadamente na obra de Popper (1968), sobre o uso e abuso das experiências imaginárias, especialmente na Teoria Quântica.

Existe, então, uma classe de experimentos que são nominados, na literatura, *experimentos mentais*. A análise deste termo e dos experimentos que são conduzidos em Ciências Naturais pode de modo simplório, conduzir a uma obviedade: *todo e qualquer experimento é, a priori, um experimento mental, pois ele é, no mínimo, antecipadamente planejado*. Não se trata, entretanto, desse tipo de experimento, mas sim daquele que é, pelo menos em parte, *conduzido* na mente humana, às vezes por comodidade, ou por fazer parte de um debate de ideias, ou simplesmente por uma impossibilidade de ser executado. Estamos optando neste trabalho pela adoção da expressão "experimento(s) mental(ais)".

Antes de se analisar as características dessa classe de experimentos, alguns exemplos podem elucidar a possibilidade, necessidade ou conveniência de se realizar experimentos para além das fronteiras do mundo físico. Como se pode depreender dessa discussão, várias facetas do fazer científico que envolve experimentos mentais, podem ser consideradas como capacidade de elaboração de procedimentos e modelos explicativos para testar hipóteses. Para ilustrar essa discussão e ressaltar o potencial didático dos experimentos mentais, adaptamos de Mach (1942), um experimento de natureza antecipatória que foi pensado com base nos seguintes aspectos. Consideremos uma balança analítica, com resolução da ordem de décimo de miligrama, suficiente, portanto, para se determinar a massa

[6] Muitos creditam a Einstein os primeiros usos do termo Gendankenexperiment, porém, embora leitor de Mach, Einstein não deve ter usado tal termo em seus escritos, até porque, do momento em que foi cunhado até sua divulgação nos meios científicos, levou mais de três décadas (GENDLER, 2003).

de uma mosca. Imaginemos, agora, que sobre o prato da balança haja um copo de vidro, com a boca para baixo e, no interior desse copo, uma mosca repousa sobre o prato da balança. A massa do conjunto aparece registrada no visor. Suponhamos agora que a mosca comece a voar no interior do copo. A pergunta a ser feita é: *a massa registrada pela balança vai mudar?*

O experimento acima pode ser facilmente executado, dependendo apenas da habilidade do seu executor em capturar uma mosca. Contudo, melhor do que executá-lo é pensar sobre seu resultado. A sua não-execução *obriga-nos* a pensar sobre todas as variáveis que podem interferir no resultado, inclusive colocando em xeque conhecimentos acerca das leis de Newton, da composição de forças, da escolha do sistema e de suas vizinhanças (o peso do ar afeta ou não o valor registrado na balança? E quando a mosca está no ar? E se ela pousar no copo e não no prato?). É preciso refletir e colocar em prática diversos conhecimentos de Física, o que não ocorreria em amplo sentido, se o experimento fosse executado. Não haveria mais o que refletir e aprender sobre ele se trabalhado com ênfase nos resultados previstos pela ciência e comprovados no laboratório.

Em parte, é assim que sucede nos experimentos propostos nas aulas práticas de laboratório. Quase todas as condições iniciais do experimento já estão estabelecidas *a priori*, tais como o equipamento que vai ser usado, a forma de detecção/observação dos eventos ou dos resultados e muitas outras variáveis. Ao estudante, cabe, quando muito, ajustar algumas variáveis, executar o experimento (que muitas vezes significa apenas apertar botões), registrar os resultados obtidos e, posteriormente, interpretá-los usando uma teoria que já lhe foi infundada. No exemplo acima, a montagem do experimento e a simples observação do mostrador da balança com a mosca pousada ou em vôo já liquidariam, de início, o convite à reflexão acerca das diversas possibilidades físicas para o evento.

O exemplo acima mostra que a realização física do experimento não é determinante para que se reflita sobre suas causas e consequências práticas e teóricas, exigindo-se, neste caso, um grau de reflexão que envolve todo o arcabouço de uma teoria. É aí que reside o valor do experimento mental, a necessidade de se colocar à prova o arcabouço de uma teoria e, às vezes, as suas sutilezas podem acabar por colocar toda teoria em xeque. Sendo assim, não é possível subestimar o valor desse tipo de raciocínio para se compreender teorias e, porque não, compreender como elas rivalizam entre si, o que traz elucidações importantes acerca das transformações sofridas pela Ciência, isto é, sua epistemologia.

Galileu foi um incomparável defensor das práticas experimentais mentais. Essa modalidade de exploração do pensamento vem sendo intensivamente utilizada pela comunidade científica com o intuito de explicar seus pontos de vista sobre suas descobertas

revolucionárias e/ou paradoxais. Nessa perspectiva, Einstein (1953) defendia fortemente a livre criação da mente, manifesta por meio de curiosidades, especulações e motivações individuais, de importância fundamental na formulação de leis e princípios que explicam a natureza.

Não é difícil perceber que a prática de se imaginar e executar um experimento permite inferir algumas conclusões cientificamente válidas para o contexto em que o mesmo foi elaborado. De qualquer modo, a ideia de experimentos conduzidos apenas na mente deve ter parecido simpática na época pré galileana, quando se entendia que a razão era suficiente para compreender que a natureza se submetia ao modelo aristotélico de mundo.

Do ponto de vista metodológico e epistemológico, todo experimento é um experimento 'pensado', pela simples razão de que o cientista precisa planejar sua atividade, o que já exige uma intensa elaboração mental, de natureza antecipatória. É preciso pensar na metodologia, no tempo disponível, na minimização dos erros, nos instrumentos necessários para a coleta de dados e na sua montagem e operação, na forma como serão coletados, na sua interpretação e na teoria que vai dar suporte a essa interpretação. Além desses aspectos, é fundamental lembrar que o cientista ainda "prevê", ou pelo menos já espera ou busca certo resultado experimental, pelo menos no sentido de "resolução de quebra-cabeças" dado por Thomas Kuhn.

4.4 Experimentos Mentais: Uma Possível Classificação

Classificar experimentos mentais implica em saber quais são suas características e verificar se há propriedades ou regularidades que possam ser consideradas como fundamentais para sua taxonomia.

A busca e análise dessas propriedades envolvem o trabalho de filósofos, lingüistas, cientistas naturais e outros especialistas, dadas as características de tais experimentos. Claro que o trabalho aqui apresentado não pretende fazer uma análise exaustiva do tema, de modo que será aqui discutida a superficialmente a taxonomia proposta por James Robert Brown, professor de Filosofia da Universidade de Toronto (Canadá), extraído da obra *The Laboratory of Mind: thought experiments in the Natural Science*, publicado por James Robert Brown em 1991. A escolha deste autor repousa no fato de ter sido

essa a única obra encontrada que compila uma classificação taxonômica que envolve mínimas considerações filosóficas e privilegia considerações operacionais.

A Figura 1 aparece na obra citada acima.

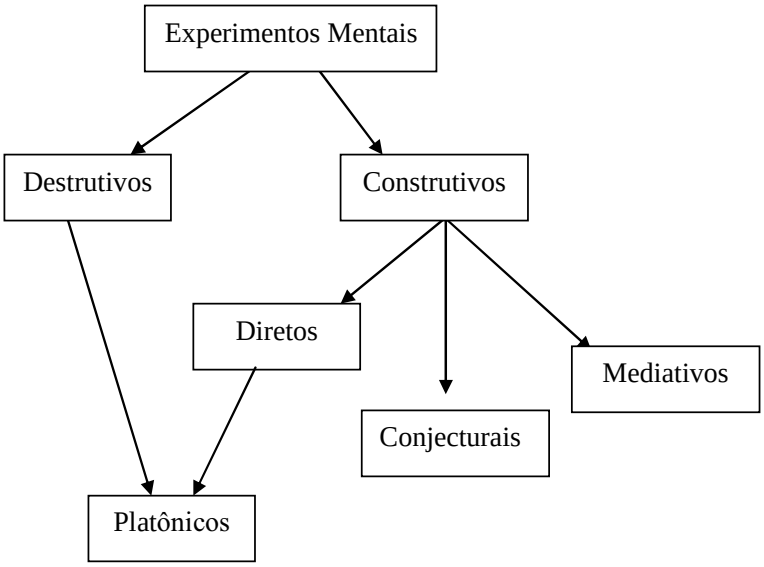


Figura 1 – Classificação taxonômica
Fonte: Brown (1991a).

Um aspecto a salientar quanto à construção de padrões de classificação é que não há esquema rígido a ser seguido. Vários autores de experiências mentais têm sugerido que se trabalhe de variadas formas, exatamente como fazem os verdadeiros experimentadores. Contudo, Brown (1991a) admite que há alguns padrões definidos e propõe como primeira tarefa, para qualquer análise de experiências de pensamento, o esquema acima representado.

Segundo este autor (BROWN, 1991a), existem dois tipos principais de experimentos mentais – um que se denomina "destrutivo" e o outro "construtivo", podendo este último ser dividido em diretos, conjecturais ou mediativos (Figura 1). Por sua vez, os construtivos diretos e os destrutivos conjecturais podem se consolidar nos experimentos ditos platônicos.

Experimento Mental *destrutivo*: como o próprio nome sugere, é um argumento dirigido contra a teoria, podendo destruir ou pelo menos impor sérias limitações. Tais imposições podem ser de quaisquer naturezas, desde uma tensão em menor escala até uma completa contradição em relação à própria teoria em questão.

A experiência do Gato de Schrödinger derrubou a interpretação de Copenhagen da Mecânica Quântica. Os corpos em queda de Galileu mostraram que a teoria de Aristóteles era logicamente impossível, visto que a mesma levou à conclusão contraditória de que corpos mais pesados caem mais rapidamente que os mais leves.

Experimento Mental *construtivo:* quando serve para prever um resultado ou até mesmo estabelecer uma teoria. Poderíamos distinguir entre aqueles que mostram uma teoria inconsistente e aqueles que mostram uma teoria em conflito com outras crenças. Como exemplo, Galileu mostrou que a teoria de Aristóteles da queda livre estava defasada.

Os EM classificados como construtivos podem ser divididos em três categorias:

a) **Mediativos**: quando facilitam uma conclusão vinda de uma teoria específica, bem estruturada, como o exemplo do experimento "O demômio de Maxwell", uma experiência mental que sugere o caráter probabilístico da Segunda lei da Termodinâmica. De acordo com esta lei, em qualquer mudança de estado, a entropia deve permanecer a mesma ou aumentar, nunca diminuir.

b) **Hipotéticos:** quando sua finalidade é estabelecer algum fenômeno (experimental - pensado) e depois busca elaborar hipóteses acerca da teoria para explicá-lo. Um experimento que exemplifica bem essa categoria é o do Balde de Newton, tomado para confirmar a teoria do espaço e tempo absolutos.

c) **Diretos**: são aqueles que não partem de uma teoria bem estruturada, mas acabam nela.

Muito embora, os três tipos de experiências visem estabelecer um resultado positivo, apresentam características bastante diferentes.

Finalmente são *platônicos*, quando admitem que os dois tipos *destrutivos* e *construtivos diretos*, simultaneamente giram em torno de uma teoria ao mesmo tempo em que estabelecem outra, como a Queda de Corpos de Galileu, que é um experimento mental único que destrói uma velha teoria e simultaneamente gera uma nova teoria como a conhecida lei da natureza é que 'todos os corpos caem à mesma velocidade'.

Apenas a título de ilustração, procuraremos abordar um exemplo de cada uma das grandes categorias acima (destrutivos e construtivos). É preciso salientar que a identificação e correlação das propriedades das categorias acima com seus exemplos constituem tarefa

extremamente complexa, uma vez que envolve aspectos filosóficos e epistemológicos que estão fora do intento deste trabalho, trazendo-se aqui apenas exemplos.

Conforme o próprio nome sugere, experimentos mentais *destrutivos* são argumentos dirigidos *contra* uma teoria. Eles destroem ou pelo menos causam sérios danos a uma teoria, normalmente apontando falhas na mesma. Um desses exemplos pode ser localizado nos *Discorsi*, conforme citado por Neves (2006).

Nos fragmentos abaixo se discute aspectos básicos da constituição do Universo, da natureza das forças e dos movimentos.

> **Salviati** – *[...] E aqui, como um último sinal de nulidade de todas as experiências apresentadas, parece-me que é o tempo e o lugar de mostrar o modo de experimentá-las todas muito facilmente. [104] Fechai-vos com algum amigo no maior compartimento existente de algum grande navio, e fazei que aí existam moscas, borboletas e semelhantes animaizinhos voadores; seja também colocado aí um grande recipiente com água, contendo pequenos peixes, suspenda-se um balde, que gota a gota verse água em outro [213] recipiente de boca estreita, que esteja colocado por baixo: e, estando em repouso o navio, observai diligentemente como aqueles animaizinhos voadores com igual velocidade vão para todas as partes do ambiente; ver-se-ão os peixes nadarem por todos os lados, as gotas cadentes entrarem todas no vaso posto embaixo; e vós, lançando alguma coisa para o amigo, não a deveis lançar com mais força para esta que para aquela parte, quando as distâncias sejam iguais; e saltando, como se diz, com os pés juntos, transporíeis espaços iguais por todas as partes. Assegurai-vos de ter diligentemente todas essas coisas, ainda que não exista dúvida alguma de que enquanto o navio esteja parado as coisas devem acontecer assim, e fazei mover o navio com quanta velocidade desejardes; porque [...] não reconhecereis uma mínima mudança em todos os mencionados efeitos, nem de nenhum deles podereis compreender se o navio caminha ou está parado. [...] E a razão de toda esta correspondência de efeitos é ser o movimento do navio, comum a todas as coisas contidas nele e também no ar, do mesmo modo as moscas e as borboletas, impedidas pelo ar, não poderiam acompanhar o movimento do navio, quando se separassem dele, por um espaço considerável, mas mantendo-se próximas, posto que o próprio navio, enquanto construção anfractuosa, leva consigo parte do ar que lhe está próximo, sem obstáculo e cansaço seguiriam o navio, [...].*
> **Sagredo** – *Estas observações, ainda que navegando não me tenha deliberadamente ocorrido fazê-las, todavia estou mais certo de que acontecerão da maneira relatada: e como confirmação disso, lembro-me de que, estando no meu camarote, encontrei-me por centenas de vezes perguntando se o navio caminhava ou estava parado [...].*

Estes destaques envolvem manipulações mentais acerca do dilema da indiscernabilidade entre movimento e repouso sobre as argumentações de Galileu, dirigidas ao princípio da relatividade do movimento.

Na classificação de Brown, o exemplo em discussão pode ser considerado *destrutivo*, ao abrir possibilidades de debilitar experiências de pensamento anteriores que se constituíram barreiras para aceitação da visão de mundo herdada do aristotelismo.

De acordo com Brown (1991), os experimentos mentais construtivos *conjecturais* não partem de uma teoria pronta, mas estabelecem um fenômeno e levantam hipóteses teóricas para explicá-lo. Dentro dessa categoria, classifica-se o experimento do balde de Newton, idealizado por Newton com o intuito de explicar, a existência de um referencial inercial que constituiria um *espaço absoluto*, considerando a concavidade na superfície da água em um dos mais notórios experimentos mentais conhecidos.

Imaginemos um balde parcialmente preenchido com água e suspenso por uma corda retorcida. A corda é solta e, conforme se desenrola, inicia-se um movimento de rotação acelerado que imprime distintos estados no sistema água/balde. Consideremos neste exemplo quatro estados, de acordo com Neves (2000).

- Estado I – antes do experimento, a água está naturalmente em repouso em relação ao balde e, portanto, sua superfície é plana;
- Estado II – no instante em que o balde é solto, não há movimento relativo entre o balde e a água, e a superfície da água está naturalmente plana, mas chega o momento em que água e balde se movem no mesmo ritmo, a água começa a adquirir o movimento rotacional do balde. Neste momento a água está em repouso em relação ao balde, mas sua superfície é côncava;
- Estado III – o experimento termina e o balde comunicará gradualmente seu movimento à água, que começa aos poucos girar e subir pelas paredes do balde. O movimento relativo entre a água e o balde vai gradualmente diminuindo até desaparecer completamente; assim, na fase final deste estado, ambos, água e balde, passam a girar com mesma velocidade angular; a superfície da água é côncava.
- Estado IV – o experimento termina ao contrário do que começou. Se frearmos o balde; a água nele contida continuará a realizar seu movimento (está acelerada em relação ao balde), sua superfície continuará côncava até o momento em que tudo voltará ar plano e haverá movimento relativo entre a água e o balde.

A questão colocada é: se a água e o balde estão em repouso um com relação ao outro nos estados I e III, por que há diferenças de curvatura da água nos dois estados?

A conclusão de Newton é que a tendência que a água tem de se afastar do eixo de rotação, não estando relacionada com o seu movimento relativo, só poderia estar relacionada com algo externo, ou seja, com o espaço absoluto.

Para Newton, espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com algo externo, sempre permanece similar e imutável. Espaço relativo em algumas dimensões móveis ou medições dos espaços absolutos se refere a sua posição em relação aos corpos. Dessa forma, *movimento absoluto* pode ser caracterizado como a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro e *movimento relativo*, a translação de um corpo de um local relativo para outro (NEWTON, 1990).

Parece óbvio que não podemos perceber espaço absoluto, podemos apenas perceber espaço relativo, pela percepção das posições relativas dos corpos. Mas não devemos confundir os dois, diz Newton em *Principia 11* aqueles que violam a pureza das verdades matemáticas e filosóficas confundem quantidades reais com suas relações e medidas sensíveis (BROWN, 1991a, 1991b)

Com estes argumentos, Newton parte de um experimento hipotético mental e propõe o papel do espaço absoluto na compreensão de movimentos absolutos e relativos.

Os dois exemplos acima procuram ilustrar e localizar situações que se enquadram na da classificação de Brown de experimentos mentais, sem querer esgotar, evidentemente, a análise estrutural da linha de raciocínio dos físicos aqui citados.

4.5 Importância dos Experimentos Mentais

Durante um longo período os experimentos mentais estiveram confinados aos campos da Física e da Filosofia. Thomas Kuhn (1977) inclui em seus estudos a função de experiências dessa natureza. O autor defende que os EM são importantes para a História da Ciência, pois permitem que as anomalias chamem a atenção dos cientistas, fazendo-os refletir sobre os paradigmas inadequados e assim, com a ajuda da ciência normal entrar em fase revolucionária (KUHN, 1964). Contudo, foi somente depois de 1980, afirma Georgiou (2005), que o reconhecimento dos EM, ultrapassou o campo da Filosofia e da Física e se estendeu para outras áreas do conhecimento. Embora, tenham permanecido por um longo

período em campos específicos do conhecimento, nas três últimas décadas denota-se uma explosão de interesse sobre experimentação que se realiza na mente, atingindo várias disciplinas, inspiradas na publicação de diversos livros e artigos, alguns deles, destinados à educação. Cabe lembrar, no entanto, que diferentemente dos experimentos físicos, aos EM não se aplicava uma metodologia prescritiva, capaz de sistematizar nas disciplinas, o trabalho experimental pensado (MACH, 1905, 1976; KUHN, 1977; GENDLER, 2003; GEORGIOU, 2005).

O que são, afinal, estes construtos e para que eles servem? Brown (1991a) admite a dificuldade em se definir os experimentos mentais e argumenta que se o conseguíssemos, seria como estar no fim de uma longa investigação. De acordo com este autor são experiências realizadas no laboratório da mente, portanto, envolvem manipulações mentais, sendo freqüentemente impossíveis de serem desenvolvidas como experimentos físicos.

Helm, Gilbert e Watts (1985), em seus estudos sobre Experimentos Mentais, lembram que estes representam somente um exemplo de uma ampla classe de atos da imaginação, ingredientes essenciais nas elaborações em física. Ainda Helm, Gilbert e Watts (1985), na perspectiva da questão que estamos tratando, nos alerta sobre o problema de se distinguir experimento mental de algum outro tipo de atividade que tenha apenas a intenção similar à de um EM, por exemplo, alguma questão do tipo: *suponha que...; imagine que...* A possibilidade de significados que derivam dessa intenção é discutida por Snooks (2006) ao considerar o uso de processos fictícios na termodinâmica, que permitem calcular a entalpia de separação do soluto, entalpia de separação do solvente e finalmente a entalpia da solução. O que parece estar associado a esse tipo de procedimento é simplesmente um processo hipotético, e não qualquer 'experimento', de alguma natureza.

Cooper (2005) adaptou a definição de Gendler, afirmando que conduzir um experimento mental é fazer um julgamento sobre o que seria um caso particular descrito num cenário imaginado. Reiner (1998) discute acerca dos EM e aprendizagem colaborativa em Física e afirma que o estudo de experimentos dessa natureza, com a ajuda de simulação computacional, torna-se uma poderosa ferramenta que pode facilitar a aprendizagem. De acordo com o autor, o resultado mais significativo de seus estudos refere-se à possibilidade de aprender na interação social, onde a soma das diversas contribuições individuais de cada estudante facilita a construção qualitativa do entendimento sobre os eventos estudados.

Os efeitos das contribuições dos diferentes autores se fazem sentir no momento em que questionamos se é possível definir um Experimento Mental e se é possível explicitar seu objeto de estudo e reflexão. Não importa qual seja o objeto de definição ou de

compreensão que melhor identifique uma experiência mental. Os autores já mencionados caracterizam EM de maneira que suas definições, em seus amplos aspectos, buscam uma convergência para atos da imaginação, modos de raciocínio e, de certa forma, conduzam à ideia de que o processo é de fundamental importância na instância de produção e circulação dos saberes científicos e escolares. Nessa perspectiva, uma definição excessivamente rígida poderia descaracterizar como não exemplo muitos dos fenômenos historicamente tidos como bons exemplos de experiências mentais.

Em lugar de buscar a melhor definição de EM, Georgiou (2005), apresenta algumas condições tomadas de Gendler (2000) e aceitas por filósofos das ciências que podem ser atribuídas aos EM como modo de raciocínio. Para o autor, tais condições se mostram mais eficazes do que uma definição, até porque estas condições, de certa maneira, guiam a seleção de EM na história da ciência, em que autores os usam como exemplos e contra-exemplos em seus argumentos. Giorgiou (2005) discute a importância de se gerar um experimento no pensamento, mesmo partindo de um pensamento trivial. O autor, fundamentando-se em Gendler (2000), destaca o quão importante é fazer distinção entre uma atividade de experiência do pensamento, auto-gerada, de uma atividade de interpretar a narrativa de um EM, elaborada por outros. A possibilidade de autogerar experiências mentais decorre da idéia de que a construção ou reconstrução dos sentidos são favorecidas no contexto das atividades a serem desenvolvidas.

É importante salientar que não se trata aqui de definir os experimentos mentais como uma classe muito destacada de outros exercícios mentais antecipatórios, mas eleger, por questões históricas ou filosóficas, alguns deles que merecem destaque maior nessa discussão. Vários autores dentre os que consultamos discutem e problematizam as experiências mentais executadas no âmbito de diferentes campos do conhecimento. Há, portanto, um arcabouço teórico que reúne diferentes visões de EM, das quais podemos refletir sobre o que tem sido feito e o que é preciso fazer para compreender e fazer uso mais significativo dessas experiências.

Assim, a partir de dados compilados das principais publicações sobre o assunto, definimos os contornos dessa abordagem. Buscamos compreender os enunciados nelas construídos como indícios de possibilidades de práticas a serem desenvolvidas na sala de aula, que contribuam para que os estudantes vivenciem no “laboratório da mente”, diferentes dimensões teóricas e experimentais acerca do conhecimento científico.

4.6 Buscando Alguns Contextos das Experiências Mentais

Experiências mentais afloraram, principalmente, na Filosofia e na Física, mas também, em outros campos do conhecimento, podendo ser encontradas na Matemática e na Biologia. Contudo, tais construtos parecem ser bem escassos em outros contextos de conhecimento.

Na Química, de acordo com Brown (1991b), tais experiências foram pouco exploradas. Sobre esta questão, Snooks (2006) argumenta que parece não haver lugar em Brown, para as peculiaridades da Química, já que as experiências mentais da Física, além de muito claras, permitem-nos um engajamento com as leis da natureza. Snooks (2006) se posiciona sobre tais experiências no contexto dos diferentes saberes, destacando a significativa disparidade entre a Química e a Física. No campo da Química, diz Snooks, parece faltar exemplos de experiências mentais bem sucedidas, em forte contraste a Física, em especial, e a Biologia, onde encontramos experiências clássicas que acompanharam as mudanças históricas, ainda hoje lembradas. O autor considera que essa assimetria não é um dado isolado, mas uma manifestação que leva em conta a distinção entre Física e Química. "As leis da Química, como exemplo a tabela periódica, são irremediavelmente especiais, visto que as mesmas fazem previsões testáveis somente para um limite muito restrito de condições físicas, as quais são necessariamente condicionadas pelas contingências da investigação química" (SNOOKS, 2006, p. 255). Tais diferenças justificam-se pelo fato de a química não manifestar suas leis em termos de declarações universais e tampouco depende de um raciocínio *a priori*.

> Claramente a palavra 'experimento' está, por si só, em condições de ser arrebatada. A palavra não nos ajudará a separar experiências de pensamento de tipos de raciocínio hipotético mais amplo. E como a síntese de 'experimento', seja talvez específica para cada disciplina, este tipo de definição não nos ajudará a descrever o que pode ser a natureza das experiências mentais em ciências, em particular (SNOOKS, 2006, p. 255).

As contribuições de Mach, Popper e Kuhn podem ser destacadas, em particular, na Filosofia da Ciência, notadamente, nos trabalhos de Mach que encorajaram a utilização de EM no ensino. Os experimentos mentais são freqüentemente usados por filósofos, especialmente, na ética e na filosofia da mente, onde procuram entender como esses

experimentos podem ser usados para resultados mais satisfatórios. Essas experiências são epistemicamente interessantes, já que podemos iniciar de uma posição de "conhecimentos prévios" e adquirir novo conhecimento (COOPER, 2005). Essa autora discute a temática em dois campos do conhecimento, aqueles que restringem sua atenção aos EM em Ciências e aqueles que os consideram em ciências e filosofia caminhando juntas. Para Cooper (2005) aqueles que consideram somente EM, em ciências, de maneira geral, não têm apresentado argumentos ao pensar que esses experimentos são necessariamente diferentes de quaisquer outros EM. Suas restrições parecem resultar de uma estratégia de pura precaução, visto que esses autores não estão certos se EM estão similarmente em filosofia e ciências, portanto, só falam sobre áreas onde estão convencidos que cabe sua justificativa de trabalho.

Cooper (2005) concorda que não há necessidade de uma delimitação rígida entre tais áreas, e apresenta duas razões pelas quais seja a melhor maneira de se proceder. Primeiro, sob o ponto de vista da simplicidade, se isso é possível, uma justificativa unificada de Experimentação Mental. A única maneira de se descobrir se há uma justificativa unificada aceitável é tentando construir uma. Segundo, a idéia de que ciência e filosofia são abordagens radicalmente distintas, a autora, admite tratar-se de ceticismo.

Em muitos casos, torna-se difícil fazer distinção entre trabalhos filosóficos e trabalhos científicos, a não ser tomando-se por base, a natureza da publicação. Além do mais, por causa da necessidade não empírica, os trabalhos envolvendo EM são particularmente parecidos, podendo estar na interface entre filosofia e ciência. Os experimentos de Einstein, Podolski e Rosen (EPR), do Gato de Schrödinger e outros são experimentos que mostram que paradoxos causais poderiam emergir se um pudesse voltar atrás no tempo e destruir a origem do outro. Dessa forma, a despeito dos vários argumentos contrários ou favoráveis a tais delimitações, uma justificativa de EM que pode englobar todos os outros EM, se "filosóficos" ou "científicos", é assim preferida. Isso tem sido ocasionalmente sugerido e, enquanto não estivermos preparados para dividir EM, em filosóficos e científicos, eles podem ser divididos em classes distintas com base no tipo de questões que o EM pode possibilitar, como: *o que poderia acontecer em determinado estado hipotético? Ou ainda: como nós poderíamos descrever situações e como poderíamos validá-las?*

Cooper (2005) admite que os EM possam ser empregados para responder diferentes tipos de questões, no entanto, não concorda que correspondam a variedades de diferentes tipos de experiências, isto é, não é plausível pensar que há processos mentais distintos no trabalho, considerando como as coisas são ao descrevê-las e ao validá-las. Assim,

nossa imaginação pode, ao mesmo tempo, criar situações e emitir juízo de valor – a descrição do evento e sua validação já são construídas em uma cena hipotética.

Sorensen (1991) argumenta em favor da legitimidade filosófica dos EM, visto que muitas vezes se configuram como pré-condições para a realização de experimentos físicos. Brown (1991a) argumenta também que a experiência mental contribui para distinguir, tanto os conceitos que facilmente caminham juntos, como os controversos.

Wilkes (1988) enumera algumas dificuldades relacionadas a experiências mentais filosóficas, dentre as quais destacamos: o fato de, se podemos imaginar algo, não significa que este algo seja possível. O que uma pessoa considera intuitivamente certo, outra pode considerar obviamente errado; assim, as experiências de pensamento levam-nos muito longe do mundo real. Brown (1991a) questiona a base requerida por Wilkes, em várias experiências de pensamento, afirmando que ela está, certamente, notando falta do contexto no qual pensar ou, em outras palavras: "uma experiência de pensamento é legítima desde que não viole as leis da natureza". Assim, Brown (1991a) relativiza a preocupação de Wilkes afirmando que não deva haver uma resposta definitiva para o questionamento, visto que se trata de uma questão que depende do grau de complexidade e da maneira como esses experimentos estão estruturados. Nesse sentido, muitas das reflexões que são feitas a respeito das experiências de pensamento filosóficas, nos remetem a diferentes concepções e finalidades de tais usos.

Snooks (2006) se posiciona sobre os experimentos mentais no contexto dos diferentes saberes, destacando a significativa disparidade entre a Química e a Física. No campo da Química, diz o autor, parece faltar exemplos de experiências de pensamento bem sucedidas enquanto que em forte contraste, a física, em especial e a biologia, com suas famosas experiências que acompanharam as mudanças históricas, ainda hoje são lembradas. Essa assimetria não é um dado isolado, mas uma manifestação que leva em conta a distinção física-química. Tais distinções justificam-se pelo fato de a química não manifestar suas leis em termos de declarações universais e tampouco seu avanço dependa de um raciocínio *a priori*.

Outros autores como Reiner e Burko (2003), também discutem a importância dos experimentos na perspectiva de suas limitações e conseqüências para a educação em física. O erro para os autores não assume caráter de falta, valor negativo, deficiência, mas deve ser visto como oportunidade privilegiada e inerente a toda construção intelectual. Outro aspecto a salientar do trabalho desses autores é que há similaridade, em termos de nível metacognitivo entre os físicos e os estudantes, divergindo apenas nas especificidades da temática estudada. No artigo: *On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the consequences for*

Physics Education, os autores destacam de Reiner (1998) cinco níveis para a realização de experimentos mentais, dos quais sugerem os momentos em que os físicos e os estudantes estão mais suscetíveis a erros.

Resumidamente, esses níveis podem ser assim descritos:

1. Questões gerais e suposições, tais como a teoria física a ser utilizada; 2. Características do mundo imaginado pelos físicos (a formulação do EM e a escolha do modelo físico a ser utilizado); 3. Deduções formais; 4. Resultados; 5. Conclusões.

Para Norton (1996), experimentos mentais científicos são nada mais que argumentos, assim como uma conclusão alcançada por um experimento não mental bem sucedido. As premissas no argumento têm sido estabelecidas de maneira aceitável para um empirista. Assim, experiências mentais são argumentos que postulam estados hipotéticos ou contrafactuais de ocorrências e evocam particularidades irrelevantes para a generalidade da conclusão.

A sua abordagem é motivada por um empirismo constante. Nesse sentido, as experiências mentais, na física, contribuem para que as informações que já temos como argumento identificável, seja um novo e misterioso caminho para o conhecimento do mundo físico.

De acordo com Norton, um EM é um argumento que culmina em uma conclusão. Há premissas claras, a partir das quais podemos trabalhar em exemplos *destrutivos* ou *mediativos*, mas, no caso de experiências mentais tanto *diretas* quanto *hipotéticas,* nós simplesmente não temos uma teoria de base bem definida, da qual podemos dizer que se configuram bons argumentos para nossa conclusão.

No exemplo do balde de Newton, uma experiência mental hipotética, o argumento culmina na idéia de espaço absoluto, postulado para explicar o fenômeno. Espaço absoluto não é a conclusão de um argumento, é a explicação para um fenômeno que Newton, em rigor, admite sem demonstração.

Para Gendler (1998), um dos críticos de Norton, o argumento não nos dará acesso a um determinado conhecimento, uma vez que não o encontramos propositalmente disponível. Elaborado de forma apropriada, um EM pode fazer uma conexão vantajosa com o conhecimento e nos permitir fazer uso da informação sobre o mundo que estava de alguma forma lá o tempo todo, se somente nós tivéssemos condições de sistematizá-los em padrões para os quais somos capazes de dar sentido.

Na opinião de Cooper (2000), Norton falha ao especificar precisamente o que ele entende por argumento. Como o autor comenta não se pode simplesmente dar significado a

argumento dedutivo, como ele explicitamente afirma que experimento mental pode ser indutivo ou dedutivo. Portanto, a autora rejeita a justificativa de Norton, de conhecimento como argumento.

Elaborar uma conclusão com base em um experimento mental é fazer um julgamento sobre o que aconteceria se o estado particular dos casos descritos em algum cenário imaginário fosse na verdade, obtido. Por outro lado, obter uma conclusão com base em um argumento não experimental mental, é ser levado por um processo de raciocínio indutivo ou dedutivo de um conjunto de premissas explícitas que não fazem referências a estados hipotéticos ou contrafactuais particulares de casos, a uma conclusão geral correspondente.

Vários autores rejeitam experimentos mentais como argumentos dedutivos. Alguns, como Sidelle (1998), consideram que não são argumentos, mas trabalham através de conexões com argumentos. Os diferentes atributos acerca das experiências mentais podem fazer com que a reflexão sobre fenômenos mobilizem a imaginação admitindo a migração de conceitos e teorias entre diferentes campos dos saberes. Admite-se que, muitas vezes, a imaginação é solicitada, sem questionar a precariedade do conhecimento, que estaria inscrito no seu próprio caráter social e construído.

Nosso intuito ao descrever alguns experimentos mentais nos exemplos a seguir, é o de fazer com que conhecimentos implícitos e explícitos nesses contextos, possam emergir de maneira a se tornarem mais claros, do ponto de vista pedagógico.

4.7 Experimentos Mentais no Ensino de Ciências

Ao planejar cuidadosamente um experimento científico a ser executado por seus alunos, o educador está diante de uma elaboração mental que vai se traduzir em seu análogo no laboratório. Dito de outra forma, o experimento vai ser “real”, ou seja, “realizado” no laboratório e, se explorado corretamente, pode conduzir a um ganho de conhecimento por seus executores. Ao contrário de experimentos físicos, os experimentos mentais nunca tiveram uma metodologia prescritiva similar, que fosse sistematizada para atividades especificamente didáticas.

A natureza dos EM e seus usos na educação têm sido pouco enfatizados, como modalidade de ensino-aprendizagem de fenômenos. Embora Mach (1838-1926), tenha sido

um dos primeiros a defender a importância da Filosofia na educação em ciências e, em especial os EM, suas contribuições não alcançaram na época um significativo espaço no cenário educacional, mostrando-se quase que totalmente ignoradas no mundo de língua inglesa (MATTHEWS, 1991).

Mach (1905) argumenta que experiências mentais são importantes não apenas para questionar, mas também como atividade de desenvolvimento mental. Nesse sentido, essas experiências são importantes para o estudante, mas o ganho com este método é imensurável para o professor, porque possibilita a ele conhecer as ideias e os conceitos fundamentais que os estudantes trazem sobre os conhecimentos investigados.

Matthews (1991), por sua vez, destaca a importância do valor didático das experiências mentais, quando se pede aos estudantes que antecipem mentalmente o resultado de um experimento. Trata-se de um processo que força a mente e revela o que o estudante pensa a respeito dos conceitos relevantes que estão sendo investigados.

Os processos pensados encorajam os estudantes envolvidos na criação de novos fatos, produzindo novas explicações. A título de ilustração, lembramos alguns desses experimentos considerados clássicos, pelos seus significados na elaboração do pensamento científico: Queda de Corpos de Galileu; Balde de Newton; Demônio de Maxwell; Microscópio raios-gama de Heisenberg e o Experimento da Dupla Fenda de Young realizado com luz.

Estes experimentos mentais, bem como os citados neste texto e outros não mencionados têm a função de colocar as questões da natureza em uma forma particularmente evidente, colocando-nos face a face com entidades que exemplificam nossas teorias e nos forçam a pensar cuidadosamente nas explicações sobre os fenômenos (CHIBENI, 1997).

As experiências e os experimentos mentais consolidaram-se como eventos importantes que podem se tornar excelentes oportunidades de aprendizagem, pelas possibilidades de articulação com outros saberes. Além disso, as fontes históricas e epistemológicas de tais experimentos representam, atualmente, um grande volume de dados, que podem ser pesquisados, na perspectiva de instrumentalizar professores e estudantes na busca de estratégias que melhorem a qualidade da educação. Nessa perspectiva, em termos de especificidades de área de conhecimento, destacamos variados aspectos que, inevitavelmente, se configuram fundamentais para a compreensão de experiências mentais. Do ponto de vista teórico, julgamos que esses aspectos permitem interpretar algumas variáveis que efetivamente contribuem para a identificação/interpretação de conhecimentos essenciais da trajetória cognitiva dos estudantes e suas necessidades de aprendizagem.

Na literatura internacional, principalmente a de língua inglesa, encontramos diversos fatores que validam o papel dos EM no ensino das Ciências e, embora sejam tomados de exemplos conhecidos e estudados há tempos, principalmente na física, alcançaram pouco êxito em relação ao ensinar e aprender ciências. Mais recentemente, os EM foram utilizados como materiais educacionais ao vinculá-los com os conceitos e princípios da física do século XX.

Exemplos relevantes de atividades que encorajam o exercício do pensamento podem ser encontrados em diferentes publicações, como em Lattery (2001). Inspirado pelo trabalho de Galileu, ele desafiou um grupo estudantes a explorar a Lei das Cordas num laboratório durante o desenvolvimento de uma pesquisa. Neste experimento, os estudantes foram desafiados a tomar medidas, a levantar hipóteses, a testar suas previsões, a comparar seus dados com os dados do modelo básico e a considerar os erros como fontes de reflexão e busca de solução para o problema em questão. Como reflexão final, Lattery destaca que os estudantes facilmente entediam a questão e rapidamente emitiam suas opiniões, pois durante a discussão dos casos extremos do problema, como ângulos muitos grandes ou muito pequenos, hipóteses foram propostas e defendidas pelos estudantes.

Atividades dessa natureza ocupam a mente e revelam quais as crenças dos estudantes sobre um conceito que está sendo investigado. Trata-se de um poderoso instrumento para professores conhecerem o que os estudantes pensam ao se reportarem a conhecimentos científicos. Para alguns estudantes, esta forma de experimento poderá se mostrar óbvia, enquanto que outros irão conjecturar os resultados de uma maneira não usual, por exemplo, fazendo associações.

Os Experimentos Mentais mostram-se desafiadores e configuram-se como fontes importantes de ideias quando envolvem problemas apropriados. Nessa perspectiva, de acordo com Valentzas, Halkia e Skordulos (2000) uma forma de motivação para familiarizar os estudantes poderia incluir atividades que enfatizem:

- o entendimento da convenção conceitual; estratégias de questionamento; ferramentas usadas na comunicação dos resultados de tais questionamentos; o papel e mecanismos do trabalho colaborativo entre cientistas e conseqüentemente, entre estudantes.

Tais procedimentos mostram que muitas atividades de conhecimentos de física clássica ou da mecânica quântica, se bem conduzidas proporcionarão uma aprendizagem mais significativa. De fato, a exposição das ideias que explicam as hipóteses, bem como a

discussão, são processos interativos utilizados para interpretar fenômenos e são fundamentais, à medida que se aplicam às novas experiências e a novos problemas, como afirmam Sanmarti et al. (2002).

Gilbert e Watts (1983) adiantam três razões para refletirmos sobre a validade das experiências mentais em atividades didáticas.

- Primeiramente, EM são indispensáveis no ensino; parece sensato ter um entendimento claro das bases deste *status*;
- Segunda, o lugar do trabalho experimental na educação em física, como tal, está sendo questionado. De um lado, a ênfase na solução de problemas se mostra atualmente, uma perspectiva interessante em termos curriculares. De outro, a disputa contínua sobre o valor de trabalhos práticos, inevitavelmente caros, e na emergência de simulações baseadas em computador (WHITE, 1984), parece tornar os EM importantes;
- Terceira, a emergência do movimento concepções alternativas, tendo identificado uma distância de tais concepções, está agora em fase movente de produção de estratégias, com outras ênfases, com o intuito de promover modificações em sala de aula. EM parecem ter um provável papel principal.

Tomemos o exemplo clássico de EM o demônio de Maxwell sobre o qual Leff e Rex (1997) salientam que sua discussão em situação de aula pode ser fundamental para o ensino e, em particular, para a história do conceito de entropia, embora a relevância de tal estudo não se limite puramente ao seu aspecto pedagógico. Um dos pontos fundamentais de todo o exercício é mostrar que o experimento viola a segunda Lei da Termodinâmica, portanto, o que era impensável, não é tão impensável assim.

Em suas várias formulações, o experimento de Maxwell pode ser útil em situação de ensino-aprendizagem, quando o estudante identifica falhas nos argumentos apresentados para um fato estabelecido, uma afirmação específica, uma previsão futura, uma explicação, e assim, se coloca diante de novas perspectivas, sobre antigas questões. Nesse contexto, os EM podem possibilitar a elaboração de novas questões que mesmo não sendo fáceis de serem respondidas, permitem o exercício da reflexão acerca das ideias geradas.

De acordo com Matthews (1991), é fundamental reconhecer que o sentido das palavras e conceitos depende dos contextos intelectuais em que ocorrem, e que muda no decorrer do tempo. Portanto, tratar o conceito é, sob vários aspectos, dar ao estudante

oportunidade de um encontro com a história, que vai além das abordagens presentes nos livros didáticos.

Tendo essas questões em mente, os EM devem ser encarados como uma das possibilidades de captar capacidades cognitivas mais amplas e complexas, por meio de instâncias discursivas fecundas e dialógicas.

Em dois artigos bastante interessantes, Helm e Gilbert (1985) e posteriormente Helm, Gilbert e Watts (1985) discutem a natureza dos EM, avaliam os critérios estabelecidos por Thomas Kuhn (1977) para sua validade e discutem sua validade na educação em Física, examinando inclusive a atitude de professores e alunos quanto ao seu uso.

De acordo com Kuhn, o sucesso na condução de um EM reside inteiramente nas informações disponíveis que estão à mão. Os experimentos mentais devem trazer alguma luz àqueles que os abordam, seja com relação à sua concepção sobre algum conceito, seja com relação acerca do mundo que nos cerca.

Duas são as características exigidas por Kuhn para a validade de um EM. Em primeiro lugar, deve permitir a abordagem de conceitos segundo os mesmos critérios com os quais eles já foram adotados anteriormente. Em segundo lugar, o conflito que põe em confronto os interlocutores deve ser tal que já os tenha confrontado anteriormente.

Helm e Gilbert (1985) se propõem a submeter experimentos mentais propostos por Einstein a estes critérios kuhnianos e mostram que alguns deles não atendem aos dois critérios simultaneamente.

Ao examinar os experimentos em seus devidos detalhes, os autores apontam algumas características interessantes das elaborações einsteinianas acerca destes exercícios mentais, mostrando inicialmente que ele conhecia bem as potencialidades dos EM e sua forma de apresentação, como se depreende de um trecho de seu trabalho clássico de 1905. “Estabelecemos assim por meio de certas experiências físicas (idealizadas) o que se deve entender por sincronismo de relógios situados em repouso[...]” (HELM; GILBERT, 1985, p. 51 Trad. nossa).

Ao propor que se imagine um trem em movimento passando por uma plataforma, com observadores em ambos, Einstein apela para a experiência comum do leitor no momento de estabelecer as bases da descrição do movimento de um objeto em movimento uniforme observado a partir de diferentes referenciais. Outro cuidado especial tomado pelo físico foi o de estabelecer condições de idealização no sentido de remover possíveis interferentes na condução do experimento. Assim, ele especifica que “devemos imaginar que o ar acima da plataforma tenha sido removido [...]” (HELM; GILBERT, 1985, p. 126, Trad. nossa).

No prefácio de seu livro, Einstein identifica seu público-alvo ao afirmar que a obra está direcionada àqueles que "[...] não são versados no formalismo matemático da Física [...]" (HELM; GILBERT, 1985, p. 127) e que presumivelmente tenham tido uma "educação padrão, correspondente àquela de curso universitário [...]", o que pressupõe o conhecimento mínimo de conceitos newtonianos como comprimento, tempo e velocidade.

Helm e Gilbert (1985) apontam outros autores de EM cuja análise põe em evidência a questão da linguagem a ser dominada pelo público-alvo.

Silva (1995 apud DENCKER, 2000) preconizou o uso das técnicas de marketing para a área de serviços, tendo apontado as técnicas dessa disciplina como sendo estratégicas para as organizações atuarem com foco no cliente.

Num experimento sobre relatividade, proposto por Bondi (1965 apud HELM; GILBERT, 1985) os autores apontam uma diferença de estratégia com relação à abordagem de Einstein. Enquanto que este usa os EM qualitativamente para preparar o leitor para deduções quantitativas de resultados relativísticos, Bondi parte de uma quantidade física simples, já estabelecida no experimento (o fator *k*, de relação de velocidade entre duas naves espaciais e feixes de luz trocados entre elas e a Terra), para deduzir os mesmos resultados. A obra de Bondi faz parte de uma série direcionada aos "jovens estudantes e leigos" (BONDI, 1965 apud HELM; GILBERT, 1985), o que nos faz pressupor que seriam exigidos deles os mesmos conhecimentos que o foram na obra de Einstein.

Helm e Gilbert (1985) continuam a relatar experimentos mentais voltados para platéias específicas. Desse modo, os autores acima citam experimentos dirigidos a plateias especializadas e publicadas na *Philosophical, Magazine* Lewis e Tolman, em 1909, e na *Physical Review* Terrell, 1959. Mesmo entre os que se opõem à teoria da relatividade especial, os EM exigem conhecimentos e linguagem mínima de seus leitores (DINGLE, 1967 apud HELM; GILBERT, 1985).

O uso dos EM em mecânica quântica também é abordado no trabalho de Helm e Gilbert. Em particular, Heisenberg concebeu o princípio da incerteza e rapidamente idealizou o experimento do microscópio de raios gama para checar sua validade. Com efeito, Helm e Gilbert (1985) comentam que o fato deste experimento poder ser analisado de modo relativamente simples usando ideias básicas acerca da dualidade partícula-onda permitiu que o mesmo estivesse ao alcance da compreensão dos não-especialistas.

Por outro lado, a famosa disputa entre Einstein e Bohr acerca dos alcances da teoria quântica foi conduzida por meio de experimentos mentais engenhosamente elaborados, em particular por Einstein, Podolski e Rosen (1935 apud HELM; GILBERT, 1985) e, embora

sobre esse aspecto Feyerabend (1970, p. 130) tenha concluído que "Bohr e Einstein argumentaram a partir de pontos de vista incomensuráveis", o experimento mostrou-se valioso para que o grupo de Copenhague compreendesse a natureza dessa incomensurabilidade.

Ao final de seu trabalho, Helm e Gilbert (1985, p. 130) comentam que

> Os experimentos mentais em mecânica quântica [...] dependem de uma 'educação padrão' que conduzem os aprendizes aos limites dessa teoria. Desse modo, ao lado de 'velhas' concepções, como posição e momento, que tiveram que ser modificadas no contexto da nova teoria, novos conceitos tais como fóton e Ψ sublinham a estrutura e interpretação desses EM. A explícita introdução de Ψ e sua interpretação como amplitude de probabilidade na discussão de um experimento mental como, por exemplo, o problema da interferência de elétrons na dupla fenda pode ser preparada para explorar a compreensão de aprendizes em comportamento ondulatório em geral e sobreposição de ondas em particular. Além do mais, isso pode ser feito antes de o estudante tomar contato formal com a equação de Schrödinger. Nesse caso [...] a função dos EM é a de promover e ampliar a aceitação de uma nova teoria (HELM; GILBERT, 1985, p. 130).

Helm e Gilbert (1985) concluem seu trabalho lembrando que muitos experimentos mentais que tiveram enorme relevância histórica, tais como o microscópio de raios gama de Heisenberg e o experimento de EPR, vêm sendo continuamente reelaborados em novas versões, o que sugere que entre os cientistas há um consenso explícito de que eles se constituem efetivamente em instrumentos didáticos bastante valiosos.

Pesquisas educacionais sobre o uso EM na prática escolar têm revelado que:

(i) Os resultados para o aprendizado são positivos quando EM são usados como base para *design* e organização de projetos estudantis (LATTERY, 2001).

(ii) EM quando conduzidos em um contexto computacional, são poderosas ferramentas para o aprendizado colaborativo (RAINER, 1998).

(iii) O uso potencial de vários tipos de EM provocando desenvolvimento conceitual foi selecionado, não para serem reconhecidos em um grau satisfatório, em livros-textos de física, mas para serem integrados com outros dispositivos pedagógicos, assim como 'simulações pensadas' (GILBERT; RAINER, 2000a).

(iv) Professores sentem que EM são indispensáveis, quando eles ensinam leis físicas aos quais se envolvem com abstratas e concisas formulações (ex.: teoria da relatividade especial), porque eles sentem que EM possibilita

alguma chance de construir uma ponte entre o conhecimento dos estudantes e a experiência diária. Nesse contexto, novos ou modificados conceitos e princípios devem ser aprendidos (HELM at al., 1985).

(v) EM são poderosas ferramentas educacionais porque estudantes usam sua imaginação para a qual é estruturada, meta-orientada, baseadas em imagens experimentais anteriores e internamente coerentes (GILBERT; REINER, 2000b).

Mach (1926) chama a atenção para a questão do erro como desafiador do próprio sentimento, atentando para a diferença sobre o que é lógico fisicamente ou associativamente determinado e, por fim, um ensinamento para discriminar entre o que pode ser suposto e o que não pode. Mach encoraja o uso de tais exercícios da imaginação e criatividade, afirmando que eles se colocam como outra forma de ponte entre as humanidades e as ciências da natureza (MATTHEWS, 1994).

Pode-se considerar que os diversos movimentos de inovações do ensino de ciências experimentaram um crescimento significativo de possibilidades, contudo, em termos de prática pedagógica efetiva, ainda há muito que se conquistar. Assim, planejar e por em prática propostas de ensino que ampliem essas possibilidades, significa defender e ampliar também o direito dos estudantes a uma educação de qualidade.

Demonstrar o lugar privilegiado que os EM têm na educação em Física e outros campos educacionais e expor algumas inadequações na compreensão coerente de sua natureza, sua estrutura e modo de operação, é resultado de muitos estudos que buscam responder aos seguintes questionamentos:

- O modelo clássico de EM, obtido da Física, é uma estrutura ideal?
- Poderiam ser os EM especialmente designados para serem ensinados, baseados no refinamento de modelos científicos?
- Qual é a abrangência dos EM como atos da imaginação e como eles podem sobrepor-se a analogias e metáforas?
- Como os EM poderiam ser incorporados mais efetivamente no livro texto e no ensino em sala de aula?
- O que poderia ser feito para apoiar estudantes em suas capacidades, para espontaneamente gerarem EM?

O uso de EM coloca, no mínimo, algumas exigências como reorganização das aulas e discussão sobre os conteúdos como corpos significativos de conhecimentos, além de considerar que é imperioso adotar nova postura de abertura frente aos fenômenos que nos cercam.

O valor dos EM em Ciências, como um caminho para a modificação de conceitos das teorias explicativas pode ser produtivo, tanto para o professor como para o aluno, por sua capacidade de permitir uma pluralidade de significações. Dessa forma, espera-se que os EM tenham um papel substancial na educação em ciências, apresentados nos exemplos da prática educacional no ensino médio e superior. A fim de levar a cabo essa intenção, é fundamental discutir as seguintes questões:

- Como os EM são apresentados e utilizados nos livros textos?
- Por que e como professores incluem EM nas suas explanações?
- Qual o entendimento que os alunos mostram a partir de experimentos mentais?

4.8 Experimentos Mentais nos Livros Didáticos

O livro didático desempenha papel fundamental na instituição de qualquer nível de ensino, numa tentativa de organizar os conteúdos, orientar a prática do professor, e, finalmente constituir-se numa fonte importante de estudos para o aluno. De um modo geral, adotam abordagens semelhantes, ao darem pouca ênfase para contextos de entidades não observáveis sobre as quais os estudantes deveriam ampliar suas explicações e poderiam também estabelecer relações específicas com conceitos conhecidos, utilizando novas ideias para explicar novos fatos, como discutem Sanmartí, Izquierdo e Garcia (2002). Embora a leitura exija certo grau de recriação, dentro de certos limites, o leitor atua simultaneamente num espaço de liberdade e num espaço de regularidades e restrições. Nesse sentido, a pouca ênfase da qual estamos nos referindo pode se constituir em obstáculos que impedem o aluno de conviver com o potencial didático do livro e interpretar seus sentidos.

Helm, Gilbert e Watts (1985) argumentam que autores de livro-texto entendem de maneira diferente a natureza dos EM e os seus usos. Alguns os usam amplamente, sem qualquer comentário sobre o fato, ou apenas mencionam o termo *experimentos mentais*. Outros podem mencionar o termo, sem elaborar significativamente sobre porque eles se utilizam dessa abordagem. Outros ainda vão mais adiante, explicitamente introduzem o termo

gedankenexperiment muito cedo no texto principal, ressaltando que tais experimentos são frequentemente utilizados na discussão de problemas mentais e podem ser úteis para experimentos físicos, informando o leitor que o uso extensivo deles é feito no livro. No entanto, em toda extensão do livro, pouco espaço é destinado para que leitor possa entender o significado, a importância e os desafios próprios das experiências e dos experimentos mentais.

De maneira geral, os livros didáticos, quando abordam experimentos dessa natureza, destacam aqueles que são propostos mentalmente pelos cientistas, sem a intenção de serem executados. As situações que são geralmente descritas para EM, existem apenas em um mundo de abstração, portanto elas não podem ser repetidas na realidade.

Helm, Gilbert e Watts (1985) se propõem a avaliar o papel dos experimentos mentais do ponto de vista educacional, trazendo as seguintes questões: como são apresentados e usados os EM em livros texto? Por que e como os professores incluem EM em suas explicações? O que compreendem os estudantes a partir dos EM?

Na primeira etapa do texto, os autores examinam alguns livros didáticos para então concluírem que os EM são introduzidos de modo que os estudantes devem evocar concepções decorrentes de experiências prévias (mesmo que de senso comum). Tais concepções são elaboradas no sentido de causar um conflito cognitivo, obrigando a esmiuçar os fundamentos destas experiências.

A análise de livros destinados a estudantes de níveis mais avançados, nos quais a teoria de Einstein é abordada como EM na sua forma original, sugere que a chave para a compreensão desta teoria reside na necessidade de os estudantes terem familiaridade, aceitação ou credibilidade com as situações apresentadas. Além disso, capacidade de aplicar "conceitos antigos" numa variedade de situações e predisposição em penetrar numa situação paradoxal estabelecida pelo próprio experimento mental. Afirmam Helm, Gilbert e Watts (1985) que os experimentos sugeridos nos livros texto para fins educacionais, parecem atender adequadamente aos requisitos inerentes ao ensino, mostrando que as situações sugeridas são facilmente compreensíveis e aplicadas e podem gerar paradoxos intrigantes.

Neste trabalho, Helm, Gilbert e Watts (1985) abordam o experimento mental da dupla fenda com elétrons, tal como proposto por Feynman, de modo mais aprofundado. Ao leitor é apresentada uma situação em que os elétrons são detectados via uso de um alto-falante, antes de os resultados serem apresentados de modo mais formal. Nesse ponto, fica claro que a linguagem matemática adotada não é ainda a da Mecânica Quântica, mas em seguida o experimento é revisitado de modo que suas implicações são usadas para se introduzir a notação de Fermi-Dirac.

Outra abordagem interessante adotada por alguns livros didáticos é a apresentação e condução mental de experimentos reais que foram importantes no desenvolvimento da Ciência. É desse modo que um dos livros examinados apresenta o experimento de Joule de conversão de trabalho em calor.

Quanto ao uso dos EM, Helm, Gilbert e Watts (1985) comentam que os professores de Física o fazem de modo sistemático, provavelmente por sua característica de abordarem "diretamente" os fenômenos físicos, sem apresentarem os confusos obstáculos dos detalhes experimentais necessariamente presentes numa descrição mínima, mas razoalvemente completa dos experimentos reais. Com efeito, os EM parecem ser um atalho curto e rápido para a percepção de resultados teóricos importantes.

Outros aspectos fazem dos EM exercícios interessantes. Quando abordados, os professores parecem aos alunos que estão "falando de física", isto é, dando ênfase a conceitos e princípios físicos, sem aprofundamento matemático, o que é usualmente reforçado pela simplicidade dos "arranjos experimentais" propostos nesse caso. Nesse contexto, o experimento de Feynman abordado no texto, torna esses aspectos bem evidentes. Nos arranjos experimentais aqui apresentados aos estudantes, para os três casos (projéteis, ondas e elétrons) havia tão somente o emissor, a parede com fendas e a parede detectora. Não havia complicações tais como o atirador ou o aparato eletrônico necessário para fazer funcionar um canhão de elétrons. Tampouco os estudantes tiveram que se preocupar com o modo pelo qual o detector funcionava.

Os experimentos mentais parecem exercer papel fundamental dentro desse modelo. Eles têm capacidade de despertar insatisfação com respeito a conceitos existentes. Sua estruturação física é bastante econômica em termos de condições de contorno, conduzindo a resultados e conclusões de modo rápido e eficaz. Em alguns casos, relatam os autores, os estudantes são capazes eles mesmos de gerar novos EM, a partir de outros que foram propostos, atendendo assim aos dois últimos requisitos acima.

Valentzas, Halkia e Skodoulis (2000) investigaram sobre EM e seu papel na educação secundária. O foco de investigação desses autores está principalmente nos tópicos: o princípio da incerteza (teoria quântica); o princípio da equivalência (teoria geral da relatividade) e consequências do princípio da velocidade da luz sobre os conceitos de espaço e tempo (teoria especial da relatividade), nos livros didáticos popularmente utilizados na Grécia.

Simplificadamente, a investigação desses alunos foi realizada em duas fases:

A – Detecção, seleção e estudos dos livros gregos mais populares, enfatizando que os experimentos mentais mais indicados para divulgação da ciência referentes aos três tópicos acima citados são: o trem de Einstein; o elevador de Einstein e o Microscópio de Heisenberg. Os resultados indicaram que 93% dos livros utilizados apresentam os EM como versão simplificada do original e o formalismo matemático é omitido ou mesmo bastante simplificado.

B – Realização da base empírica com três equipes de estudantes que não tinham estudado os temas propostos. Como aspecto positivo dessa fase, pode ser destacado o forte engajamento dos estudantes possibilitando: argumentação entre eles, ajudando significativamente na interação com aqueles estudantes que apresentavam mais dificuldades; o enriquecimento do grau de compreensão de conceitos relevantes; a compreensão da terminologia adotada, até mesmo para os estudantes com mais dificuldades.

Na perspectiva de ressaltar a importância dos EM, no ensino de ciências Gilbert e Reiner (2000) discutem o potencial de tais experimentos na educação científica. No texto *Thought experiments in science education: potential and current realization*, os autores apresentam uma tipologia de EM, com exemplos da história da física e discutem seus usos no desenvolvimento de conceitos como complemento para trabalhos práticos convencionais. Eles analisaram três livros didáticos de física do ensino superior, adotados em três instituições de ensino e concluíram que os potenciais didáticos dos EM, não são considerados em tais livros, ou encontraram-os apenas integrados a outros dispositivos pegagógicos. Nessa perspectiva cabe alguns questionamentos:

Se os experimentos mentais proporcionam uma ponte entre conhecimento existente e conhecimento a ser apreendido, como eles fazem isso?

Ao professor, compete mediar o processo de leitura, percebendo os limites interpretativos postos tanto pelo texto como pelo ato de ler. Nesse processo, os questionamentos, as reflexões e contestações, os desacordos e os confrontos intelectuais são situações privilegiadas que possibilitam a construção de significados, como exigem os EM.

Desse modo, não há como relegar para segundo plano as potencialidades didáticas de se explorar tal modalidade de exercício mental, no sentido de um forte ganho de capacidade reflexiva e de aprendizado por eles proporcionado.

No âmbito do ensino, os usos de experimentação mental têm marcos importantes, e foram, de alguma maneira, trazidos neste estudo. Acrescentaríamos ainda, que um aspecto teórico fértil seria dar mais ênfase ao discurso em sala de aula, no sentido de tentar entender

sua lógica. Isso evidentemente reclama novos olhares, que contemplem acertos, erros, hesitações, conflitos, enfim, a relação do estudante com o saber.

Finalmente, neste estudo buscamos algumas contribuições que envolvem habilidades criativas para serem executadas no laboratório da mente. Os referenciais teóricos consultados, tanto aqueles favoráveis, quanto aqueles que ressaltam as limitações dos Experimentos Mentais nos possibilitaram inferir que, sob diferentes perspectivas, os estudos relacionados à EM podem ser potencialmente úteis na educação em ciências. É fundamental considerar também que há na literatura, propostas explícitas de EM que abrem variadas possibilidades de maneiras de providenciar um suporte positivo para a teoria, ao mesmo tempo em que podem desenvolver o senso de satisfação e entendimento nos estudantes. Contudo, é pertinente lembrar que são poucas as publicações destinadas à educação em ciências que sugerem a discussão de experimentos mentais de maneira mais elaborada e significativa.

Esperamos que os aspectos aqui pontuados possam contribuir para uma reflexão sobre a utilização de EM, como ferramenta útil para o tratamento de problemas conceituais e teóricos, principalmente as interpretações que nos levam a inferir sobre a mecânica quântica.

5 O EXPERIMENTO MENTAL ABORDADO NESTE TRABALHO

Neste trabalho, é feita uma proposta didática em que foi apresentado aos estudantes um experimento mental que, durante muitos anos, não foi realizado em laboratório, o experimento da dupla fenda de Young aplicado a elétrons.

De modo geral, o experimento da dupla fenda expõe a impossibilidade de se conhecer o comportamento de um objeto quântico enquanto ele não se manifesta como um "fenômeno completo" no sentido dado por Niels Bohr (PESSOA JR., 2005). Nesse sentido, é evidente a completa impossibilidade da representação analógica (o que inclui qualquer imagem mental) de um elétron que percorre o espaço entre duas fendas de dimensões apropriadas e um detector.

Trata-se, então, de um excelente recurso didático que, nesse caso, esclarece tal impossibilidade, remetendo à noção de que, não havendo modelo analógico, resta, como único modelo possível para representar o comportamento do elétron, o modelo matemático.

A constatação de que entidades físicas interagem com sistemas de uma ou duas fendas estreitas, não é nova. Essa percepção se deu com a luz inicialmente, num experimento que resolveu um embate acerca de sua natureza, disputado no século XVII por Newton e Huygens. Antes de abordarmos o experimento aplicado a elétrons, vejamos um pouco de sua história.

5.1 O Experimento da Dupla Fenda: Alguns Pressupostos Históricos

O estudo histórico dos principais pressupostos que identificam o experimento da dupla fenda coloca-se como reabertura de questões altamente influentes em vários campos da teoria quântica. Embora amplamente discutidas, essas questões nos remetem ao século XIX, quando a teoria corpuscular da luz foi fortemente atacada e acabou sendo substituída pela teoria ondulatória, graças aos trabalhos de alguns cientistas, particularmente Thomas Young (1773-1829) e Augustin Fresnel (1788-1827). Nessa perspectiva, considerando o particular interesse de Young pela luz, iniciaremos nossa reflexão situando aspectos que influenciaram de alguma forma seu trabalho sobre um dos experimentos mais famosos da história da Ciência.

Sem dúvida, essas discussões desencadearam muitas controvérsias, sendo que as mais contundentes podem ser consideradas aquelas voltadas para a natureza e velocidade da luz, considerada finita para uns e infinita para outros. De acordo com Carvalho (2005), depois de algum tempo e muitos trabalhos, especialmente os de Olaüs Röemer (1644-1710), Armand Hypolitte Louis Fizeau (1819-1896) e Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), verificou-se que a velocidade da luz é muito grande, porém finita.

Na segunda metade do século XVII, Isaac Newton iniciou o estudo da luz e suas propriedades, defendendo a hipótese de que era constituída de corpúsculos. Newton deixou claro que admitia que os corpúsculos de luz e a matéria dos sistemas ópticos, tais como espelhos, lentes, fendas e outros, trocavam "informações" a que dava o nome ora de "vibrações", ora de "espírito da matéria", ora de "alguma coisa de natureza imaterial".

> Onda ou partícula? Eis as principais preocupações a respeito da natureza da luz que ocuparam boa parte do tempo, da história e da vida dos cientistas que se dedicaram a estudar esse assunto. Os principais foram Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727) que defenderam a teoria ondulatória e a corpuscular respectivamente (CARVALHO, 2005, p. 4).

Afinal, qual é a natureza da luz? Se buscarmos a antiga Grécia, encontraremos relatos de estudos sobre variados fenômenos ópticos. Aristóteles (384 a 322 a.C.) foi o primeiro a adotar a natureza ondulatória da luz, ao considerar o princípio segundo o qual um fluido imaterial chegava aos nossos olhos, vindo de objetos visíveis através de ondas. Contudo, não foram somente os gregos a estudarem a luz e suas propriedades. Com efeito, há evidências de que os árabes e chineses também conheciam alguns princípios básicos que norteavam os fenômenos ópticos. O árabe Ibn Al-Haytham (965-1039), conhecido como Alhazen, rejeitava o princípio grego de que a luz era emanada do olho. Para ele,

> [...] a luz era emitida por uma força autoluminosa que constituía uma fonte primária, no entanto, a luz também poderia ser emitida por uma fonte secundária, caso das partículas de poeira que compõem um facho de luz solar, em "forma de esfera" (princípio das ondas secundárias de Huygens). Al-Haytham descreveu as cores como sendo independentes dos objetos, mas presentes na luz, ou seja, misturadas a ela e nunca visíveis sem ela. É a Al-Haytham que devemos a introdução do conceito de 'raio de luz' graças às suas explicações coerentes sobre alguns fenômenos ópticos (CARVALHO, 2005, p. 5).

De acordo com Carvalho (2005), os filósofos Epicuro (342-270 a. C.), Aristóteles (384 a 322 a. C.), Empédocles (492-432 a. C.), Robert Grosseteste (1168-1253), Leonardo da Vinci (1452-1519), René Descartes (1596-1650), padre Francesco Grimaldi (1618-1663), além de Robert Hooke (1635-1703) explicitaram, de alguma forma, várias concepções sobre as propriedades da luz que possibilitaram um panorama ilustrativo dos fenômenos ópticos. Vários estudos foram fomentados tanto do ponto de vista artístico como científico, todos eles com o objetivo de desvendar a natureza da luz.

Nesse contexto, em 1665, Grimaldi observou um fenômeno interessante quando olhava em uma câmara escura, a sombra de um objeto delgado provocada por uma luz forte ao atravessar um orifício. Contrariamente ao que se esperava, foi observado um padrão de franjas. Sobre este fenômeno, Grimaldi (1665) afirmou que, incidindo luz a um corpo luminoso, ele torna-se obscuro. O movimento descrito é o da difração e o levou a uma concepção de movimento vibratório da luz. A relação das cores com o movimento vibratório levou Hooke a afirmar que o movimento da luz é produzido por ondas perpendiculares à linha de propagação.

Em que pesem as duas possibilidades, onda ou partícula, a teoria corpuscular era aceita pela maioria dos cientistas do século XVIII. No entanto, Newton havia evidenciado algumas dificuldades com essa teoria, especialmente pelo fato de que a difração não era facilmente observada, como era para outros tipos de ondas, por exemplo; o som e ondas de água. Ele não rejeitou a ideia de uma perturbação periódica para os fenômenos luminosos, mas avançou em termos de teoria corpuscular e, por conta de sua notoriedade, sua concepção foi amplamente aceita pelos seus contemporâneos.

Hooke (1635-1703) e Huygens (1629-16945) continuaram, contudo, a sugerir teorias ondulatórias. Hooke para responder pelas cores em filmes finos e Huygens para responder pela velocidade finita de luz, já determinada por Orlaus Roemer (1644-1710), baseada nos eclipses das luas de Júpiter.

O modelo de Newton viria a persistir por muito tempo, não apenas por seu prestígio, mas pela explicação considerada coerente para as cores da luz. Newton tinha escrito sobre um fenômeno curioso, os anéis coloridos que se formavam ao sobrepor duas lentes. Ironicamente, Newton não considerava esse efeito como uma possível propriedade da luz e, no entanto, os chamados anéis de Newton representam uma das melhores provas da natureza ondulatória da luz, uma verdade que o próprio físico não quis reconhecer.

O abalo do modelo corpuscular viria a ocorrer somente no início do século XIX. Por volta de 1801, o físico britânico Thomas Young (1773-1829) resolveu a questão

favoravelmente à Huygens, realizando o primeiro experimento para demonstrar o caráter ondulatório da luz. Essa demonstração ocorreu por conta da verificação dos fenômenos da difração e da interferência, características exclusivas de fenômenos ondulatórios.

Thomas Young – médico, físico e egiptólogo – nasceu em Milverton, Inglaterra, no dia 13 de junho de 1773, no final de um período conhecido como o da Revolução Intelectual.

Young começou a estudar medicina em 1792 em Londres, em 1794, partiu para Edimburgo e um ano depois para Göttingen, onde obteve o título de doutor em física. Em Cambridge, dedicou-se à pesquisa científica. Era um homem de talentos diversificados, lia aos dois anos de idade e seguiu apropriando-se de várias línguas. Ao longo de sua vida, comparou gramática e vocabulário de aproximadamente 400 línguas. Sua paixão pela egiptologia o levou a fazer parte do grupo envolvido no deciframento das inscrições da pedra de Rosetta, por Jean François Champollion (1790-1832), constituindo-se uma das chaves para o entendimento dos escritos hieróglifos egípcios.

Em1793, ele escreveu uma série de artigos sobre a visão, criando a óptica fisiológica e muitos de seus escritos foram publicados no anonimato com o intuito de proteger sua reputação como físico. Em 1799, Young estabeleceu-se como médico em Londres, onde foi eleito para o *staff* do Hospital St. George. Embora tenha exercido sem sucesso a prática médica, seus estudos resultaram na descoberta do astigmatismo, em 1801, bem como na sugestão de que havia três tipos de detectores de cores em nossos olhos (SILVER, 2003). Em 1801, ele formulou a primeira explicação científica, em termos de hipótese, para a sensibilidade do olho humano às cores e somente cerca de 50 anos mais tarde Hermann von Helmholtz, físico e fisiologista inglês, desenvolveu essa hipótese, tornando-a uma teoria aceita universalmente. Segundo a teoria de Young-Helmholtz, a retina possui três espécies de células sensíveis, cada uma delas seria responsável pela percepção de uma dada região do espectro luminoso.

Escritor autorizado para vários assuntos, quando convidado a contribuir com a Enciclopédia Britânica, ofereceu artigos sobre anuidades, atração, ação capilar, coesão, cor, orvalho, Egito, o olho, foco, fricção, hieroglífico, hidráulicas, movimento, resistência, navios, som, força, marés, ondas e “qualquer coisa de natureza médica”. Foi “inspetor de cálculos” e médico de uma companhia de Seguros de Vida em Londres, além de conselheiro para o Almirantado em construção naval, secretário da Tábua de Longitude e superintendente do Almanaque Náutico (ROBINSON, 2005).

Em 1803, Young realizou uma experiência e demonstrou que a luz possuía natureza ondulatória. Fez um feixe de luz monocromática passar por uma abertura estreita e constatou que, num anteparo instalado do outro lado, não surgia simplesmente uma linha nítida, mas sim um conjunto de faixas luminosas de diferentes intensidades. Isso mostrava que a luz sofria difração, tal como ocorria com as ondas sonoras ou as de um lago. Se a luz fosse constituída de partículas, esse comportamento seria impossível.

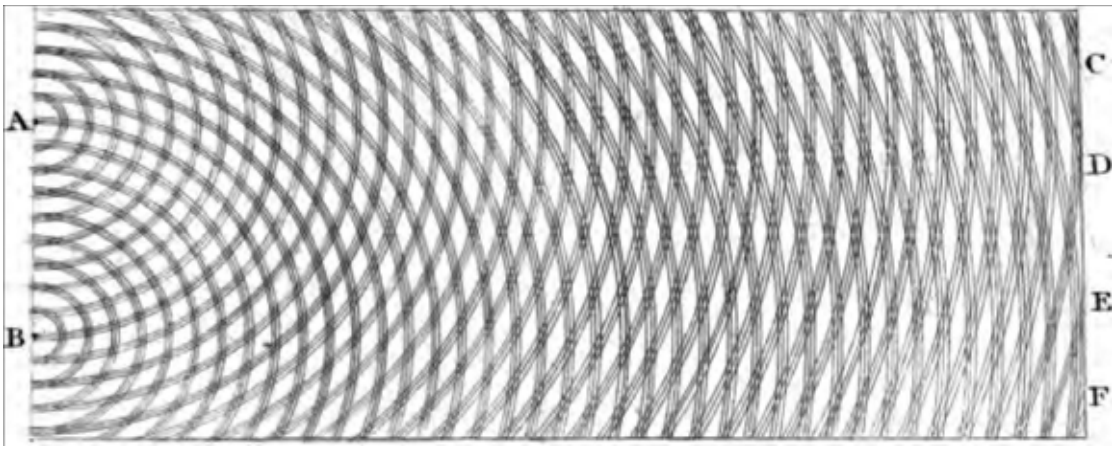


Figura 2 – Frentes de onda
Fonte: Young (1845, p. 220 e 364).

Para confirmar esse resultado, desenvolveu outro experimento e fez a luz passar por duas fendas separadas por uma distância muito pequena e projetou a imagem produzida sobre anteparo distante. Young observou a formação de um padrão luminoso que apresentava áreas claras entremeadas com outras totalmente escuras. No lugar de duas linhas de luz, como era de se esperar, a imagem mostrou uma mancha grosseiramente elíptica, cortada por linhas paralelas escuras, que se caracterizavam por bandas alternadas de escuridão e de luz. Young entendeu que havia demonstrado o comportamento ondulatório da luz, visto que as linhas escuras só podiam ser causadas pela interferência de ondas, da mesma forma que se explicava a interferência das ondas de água.

Apesar dessas evidências, tais demonstrações foram consideradas insuficientes, por muito tempo, na Inglaterra, até serem complementadas, mais tarde, pelo trabalho de outros pesquisadores europeus. Com efeito, o experimento da dupla fenda conseguiu abalar a teoria do fenômeno corpuscular da luz, visto que os fenômenos de difração e de interferência

eram características exclusivamente ondulatórias. Este foi um dos passos fundamentais para que, mais tarde, Broglie propusesse a dualidade partícula-onda, sugerindo a possibilidade de ocorrência desses fenômenos para o caso de partículas.

5.2 Retomada do Confronto Corpúsculo Versus Onda para a Radiação Eletromagnética e o Princípio da Complementaridade de Bohr

O problema da natureza da radiação eletromagnética parecia estar resolvido no final do século XIX. Entendia-se a natureza como constituída de duas categorias de objetos: as *partículas* e as *ondas*. O comportamento dos primeiros objetos estaria plenamente explicado pela Mecânica de Newton. Por outro lado, o comportamento das ondas de luz estava totalmente explicado pela Teoria Eletromagnética de Maxwell, uma profunda consolidação do estudo de diversas leis da eletricidade e do magnetismo que ocorreram no século XIX e conduzidas notadamente por Gauss, Ampère e Faraday (OSADA, s/d, p. 29).

A compreensão mais detalhada do debate acerca da dualidade partícula-onda deve ser feita com base em considerações acerca do processo de interação da luz com objetos, em particular com fendas. De fato, seu comportamento (se corpuscular ou ondulatório) vai depender essencialmente da relação entre a dimensão do objeto (chamemos aqui de dimensão a) e do comprimento de onda da luz (λ). Na condição em que $\lambda/a<<1$, isto é, quando o objeto (por exemplo, a largura de uma fenda atravessada por um raio de luz) for muito maior do que o comprimento de onda da radiação, então o comportamento da luz pode ser considerado como corpuscular. Por outro lado, quando a relação acima se aproxima da unidade ($\lambda/a\sim1$), a luz acaba por exibir os efeitos de interferência e difração, típicos do comportamento ondulatório.

O comportamento dual, acima descrito, exibido pela luz era bastante conhecido no início do século XX. Em 192, o estudante francês Louis de Broglie sugeriu em sua tese que a matéria pudesse exibir comportamento ondulatório.

Segundo sua proposição, os elétrons também poderiam exibir comportamento típico daqueles das ondas, tais como difração e interferência, vinculado à equação $p = h/\lambda$, em que p = *momento linear;* h = *constante de Planck e* λ = *comprimento de onda.* Desse modo, ficava compreendido porque não se observa comportamento ondulatório da matéria

cotidianamente, visto que raramente se cumpre a condição em que $\lambda/a \sim 1$ para os sistemas típicos de interferência.

A hipótese de De Broglie obteve pouco sucesso até que Davisson e Germer observaram, em 1927, fenômenos de difração de elétrons que incidiam num alvo de níquel. Os físicos mediram, inclusive, o comprimento de onda correspondente aos elétrons. Naquele mesmo ano, G. P. Thomson observou difração de elétrons transmitidos através de películas metálicas. Esses efeitos ocorrem claramente em virtude de os elétrons estarem atuando sobre materiais cujas dimensões estruturais básicas (a dimensão *a* acima citada) são suficientemente pequenas para provocar a manifestação ondulatória de objetos até então considerados como puramente corpusculares.

5.3 O Princípio da Incerteza de Heisenberg

A hipótese de uma componente ondulatória no comportamento de partículas impõe alguma deslocalização no sistema. Partículas têm trajetória definida mesmo depois de atravessarem uma fenda estreita, enquanto que ondas sofrem difração e se espalham a partir dessa mesma fenda. Neste sentido, a dualidade partícula-onda impõe uma séria limitação à execução de medidas em sistemas muito pequenos: é impossível medir, simultaneamente e com precisão absoluta, determinados pares de propriedades físicas dos objetos. Por exemplo, para uma partícula que se desloca numa dada direção *x*, é impossível medir com precisão ilimitada os valores do *momento p_x da partícula e sua posição x*. Em outro exemplo, é impossível executar simultaneamente uma medida de energia *E* durante certo tempo de observação *t*, ambos com precisão infinita. Esses dois exemplos se consolidam nas equações $\Delta p_x . \Delta x \geq h/2\pi$ e $\Delta E . \Delta t \geq h/2\pi$.

As consequências filosóficas deste resultado não são nada desprezíveis. A mecânica de Newton havia estabelecido uma corrente filosófica conhecida como determinismo clássico. Segundo essa corrente, conhecidas as variáveis dinâmicas de um sistema (posição inicial e velocidade), seria possível prever *completamente* a situação passada *e futura* desse sistema. Isso equivale a dizer que, pelo menos em teoria, se fosse possível construir um computador e alimentá-lo com as informações de posição e velocidade de todos os corpos do Universo, seria possível determinar a situação futura do Universo todo ou, dito

de outra forma, nosso futuro seria já conhecido, a menos da limitação da construção do computador que fizesse os cálculos.

O princípio da incerteza justamente joga por terra a possibilidade acima, uma vez que estabelece uma proibição para o conhecimento completo de variáveis dinâmicas importantes do sistema. Joga-se, então, com a noção de *probabilidade* dos valores dessas variáveis (por exemplo, a probabilidade de a partícula se encontrada na posição x).

As consequências do que foi dito acima também não são pequenas. O que ocorre é que há o rompimento da noção de realidade objetiva, que tem existência independentemente do observador. A partir do princípio da incerteza, é possível inferir que, ao medir ou observar um objeto, *nós o estamos modificando* e, portanto, a realidade observada não corresponde mais à situação original. O princípio da incerteza mostra que nós alteramos um sistema ao tentar medi-lo e que o resultado obtido depende do tipo de medida feita. Dito de outra forma, *a realidade que observamos vai depender de nós e da medida que executamos!*

Uma última questão ainda ficava para ser resolvida. Embora já houvesse ficado clara a possibilidade da luz (e da matéria) exibir propriedades corpusculares e ondulatórias, ainda não se compreendia bem em que circunstâncias isso se dava.

Niels Bohr procurou resolver essa questão em 1926, lançando mão do *princípio da complementaridade*, segundo o qual

> [...] os modelos ondulatórios e corpusculares são complementares; ou seja, se uma medida prova o caráter ondulatório da radiação, então é impossível provar o caráter corpuscular na mesma medida e vice-versa. Dessa forma, a definição do modelo utilizado é determinada pelo tipo de experimento físico realizado (HOLLAUER, 2008, p. 52).

A combinação dos dois princípios acima descritos, o Princípio da Incerteza e o Princípio da Complementaridade, mostram-nos que, se tentarmos observar o comportamento de sistemas diminutos tais como elétrons, sob determinadas condições, esse comportamento será ditado justamente pelas condições impostas. Por exemplo, diante da pergunta: o elétron é uma partícula ou uma onda? A resposta a essa pergunta exige um experimento. Ao se fazer o experimento, a resposta ficará estabelecida já pelo tipo de arranjo experimental escolhido. Dito de outra forma, se montarmos um equipamento que detecta propriedades de partículas, tais como trajetória e deslocamento de massa, então, o elétron vai se comportar como

partícula. Por outro lado, se montarmos um arranjo que detecta propriedades ondulatórias, tais como difração e interferência, o comportamento do elétron será o de uma onda.

Mas a pergunta persiste: mas afinal, antes de ser detectado, o elétron é uma partícula ou uma onda? Essa questão angustiou físicos em especial do começo do século XX. Niels Bohr e seus colaboradores de Copenhague estabeleceram que seria impossível responder a essa questão antes que o elétron fosse detectado. Isso significa que, para se ter uma resposta a essa pergunta, seria necessário que o elétron alcançasse um detector para que seu comportamento se traduzisse como uma dessas entidades possíveis (partícula ou onda). Dito de outra forma, para se ter uma resposta, seria necessário que ocorresse o que Niels Bohr chamou de um "evento completo", e que seria impossível falar qualquer coisa antes de o evento se completar, isto é, antes de o elétron alcançar o detector.

Vemos aí a forma mais aguda e ortodoxa de interpretação do comportamento quântico, *a realidade se faz somente após o evento se completar, isto é, somente após ser feita uma observação, que já vem eivada de resultado, em função do aparato experimental adotado.* O que é a realidade, então? Ela existe? Ou foi o cientista que a criou no momento da medição?

Desnecessário afirmar o quanto tais hipóteses pareceram estranhas aos cientistas que vivenciaram o momento em que elas foram elaboradas. A descrença tomou conta de muitos deles e não foi pequeno o empenho em que se envolveram cientistas do calibre de Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg e Linus Pauling para derrubá-las.

O mais interessante de tudo isso foi que, previsivelmente, a forma escolhida para conseguir tal intento foi uma elaboração exaustiva de "Experiências Mentais". É fácil compreender essa previsibilidade: sistemas quânticos são muito pequenos e (ou pelo menos eram, antes da nanotecnologia), era impossível construir arranjos experimentais para detectar elétrons individuais.

Estes experimentos não serão abordados aqui (a menos de um deles), uma vez que não é objetivo desta Tese esmiuçar os elaborados detalhes e as complexas teorias e hipóteses que estes experimentos tentaram abalar ou consolidar. Contudo, não vamos nos furtar a elencar três deles:

- A Balança para pesar fótons de Einstein, experiência mental elaborada para tentar provar que é possível medir tempo e energia simultaneamente.
- O paradoxo de Einstein, Podolski e Rosen (EPR), que questionava o caráter probabilístico da Mecânica Quântica.

- O experimento da Dupla Fenda com elétrons, experimento mental que comprovaria ou não o indeterminismo quântico antes da ocorrência de um "evento completo" de Bohr e a realidade emergente local do sistema.

Chegamos, por fim, ao intento desse trabalho. A escolha deste experimento foi feita considerando a elaboração de uma unidade didática a ser aplicada em alunos que cursam a disciplina de Química Quântica. O programa da disciplina está estruturado, em seu início, da seguinte forma:

- Mecânica Quântica antiga e alguns eventos precursores: o problema da radiação do Corpo Negro, a capacidade térmica dos sólidos, o efeito fotoelétrico e o efeito Compton.
- A hipótese da quantização da energia.
- Niels Bohr e o espectro atômico do hidrogênio, hipótese de quantização das órbitas.
- A dualidade partícula-onda e o Princípio da Incerteza.
- A mecânica ondulatória de Schrodinger.

Assistimos às aulas do primeiro semestre da disciplina e constatamos a dificuldade que os alunos exibem em compreender a impossibilidade de se fazer representações físicas/analógicas do que seriam os elétrons e a dificuldade que eles têm em se lidar com a noção de probabilidades "ondulatórias" segundo a interpretação de Max Born. Assim, resolvemos aproveitar o experimento da Dupla Fenda com elétrons para colocar o aluno em contato com a noção de realidade local construída (ou irrealidade antes de um evento se completar) e, com isso, justificar a impossibilidade de representações imagéticas dos elétrons, daí a necessidade da representação puramente matemática, traduzida nas funções de onda.

Serão feitas, agora, algumas considerações sobre o experimento da Dupla Fenda com elétrons.

5.4 O Experimento da Dupla Fenda com Elétrons

Conforme visto anteriormente, não somente a luz, mas também partículas (como átomos e elétrons) podem exibir interferência ao atravessar um meio cujas dimensões sejam

suficientemente pequenas para fazê-los exibir comportamento ondulatório. Assim, destaca-se o problema da dupla fenda com elétrons.

Podemos dizer que, por várias razões, trata-se de um experimento especial. Primeiro, por colocar em evidência toda a estranheza do comportamento quântico. Segundo, por derivar de um experimento clássico que ocupa o primeiro lugar de uma lista de experimentos escolhidos, por sua elegância, por um conjunto de físicos em 2002 (CREASE, 2002).

Levantadas já diversas considerações sobre as experiências mentais tanto em termos de exemplos como de características, vamos nos deter um pouco mais no experimento da fenda dupla, particularmente por nortear o objeto de investigação desta pesquisa e possibilitar a reflexão sobre as representações de estudantes universitários.

Durante muitos anos, a execução do experimento da dupla fenda com elétrons permaneceu como uma atividade puramente mental. Trata-se de um clássico Experimento Mental, que só veio a encontrar realização física na década de sessenta do século passado.

Em 1961, Claus Jönsson realizou o experimento da dupla fenda com elétrons. O experimento não ganhou muita repercussão, por ter sido publicado em alemão. Outra razão é porque havia pouco incentivo para realizar o experimento pensado no laboratório. Somente 13 anos depois, em 1974, foi publicado no American Journal of Physics, v. 42, p. 4-11. Os editores do jornal descreveram que era um grande experimento, mas havia pouca recompensa para realizá-lo como experimento real e torná-lo pedagogicamente claro (CREASE, 2002).

Em 1989, Akira Tonomura[7] e coorientadores da Hitachi construíram um sistema em que uma fonte muito fraca era capaz de enviar elétrons individualmente na direção de um biprisma. Trata-se, na essência, de um filamento vertical. Ao alcançarem tal filamento, os elétrons podem atravessar de um lado ou de outro deste, de modo similar a um par de fendas. Os cientistas observaram a formação de um padrão de franjas de interferência, constituídas por um conjunto de pontos individuais, indicando que o detector estava observando partículas. De modo geral, o experimento da dupla fenda expõe a impossibilidade de se conhecer o comportamento de um objeto quântico enquanto ele não se manifesta como um "fenômeno completo", no sentido dado por Niels Bohr. Nesse sentido, é evidente a completa impossibilidade da representação analógica (o que inclui qualquer imagem mental) de um elétron que percorre o espaço entre duas fendas de dimensões apropriadas e um detector.

[7] Ao leitor interessado, sugerimos uma visita à página http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/movie.cfm, em que pode ser encontrado um filme que mostra a evolução do resultado obtido por Tonomura na tela do osciloscópio do experimento (American Journal of Physics, v. 57, p. 117-120, In Physics World).

Trata-se, então, de um excelente recurso didático que, nesse caso, esclarece tal impossibilidade, remetendo à noção de que, não havendo modelo analógico, resta, como único modelo possível para representar o comportamento do elétron, o modelo matemático.

6 BASES TEÓRICO-METODOLÓGICAS

As transformações ocorridas desde o Renascimento até o início da Ciência Moderna foram marcadas pela necessidade de se investigar em que medida o saber científico gera conhecimento capaz de explicar o mundo. Os critérios e métodos para a "*aquisição do conhecimento verdadeiro*" passaram a ser questionados desde a instauração do período moderno e se estenderam até o século XX, período no qual a ciência se caracterizou, sobretudo, pela primazia da racionalidade técnica e instrumentalista.

Do ponto de vista dos procedimentos, a ciência moderna, ao priorizar um método único, aplicável a qualquer construção científica, prende-se às propriedades da lógica formal e acaba por simplificar a realidade, criando uma espécie de aprisionamento em relação aos conhecimentos que explicam o mundo. A ciência moderna, afirma Certeau (1999), desenvolveu uma linguagem operatória ao definir seu objeto, racionalizar sua coleta, analisar e transformar seus dados em algo a ser reproduzido. Assim, buscou a delimitação e a simplificação de seus objetos, exercendo domínio sobre o *corpus* que circunscreve e sobre as operações que aí se efetuam. Para justificar ou legitimar o conhecimento científico e estabelecer seus fundamentos lógicos e empíricos, o que importava era um critério ideal, segundo o qual o cientista e a comunidade científica deveriam pensar e agir. Esse modelo encontrou significativa resistência, sobretudo com os filósofos Karl Popper, Imre Lakatos, Paul Feyrabend e Thomas Kuhn.

A pesquisa científica não deve, conforme Kuhn (1970, p. 232), ser orientada apenas por teorias que, no sentido tradicional do termo, privilegiam os conceitos e as leis, mas orientar-se por algo mais amplo, que ele chamou de 'paradigma', formado por leis, conceitos, analogias, valores, regras, instrumentos e, ainda, pelos 'exemplares' que são "soluções concretas de problemas que os estudantes encontram desde o início de sua educação científica, seja nos laboratórios, exames ou no fim dos capítulos dos manuais científicos". Nessa perspectiva, a "crise dos paradigmas" atinge seu auge na década de sessenta do século XX com os questionamentos de Kuhn e, como consequência, consegue abalar fortemente a confiança na objetividade e racionalidade da ciência. Assim, ao negar a existência de critérios objetivos, o autor pretendia explicar por que os cientistas mantêm as teorias apesar de suas discrepâncias e por que, no fim, elas são abandonadas.

Em meio às críticas dirigidas a Kuhn, que defendia a impossibilidade de uma avaliação objetiva de teorias científicas, muitos cientistas sociais buscavam maneiras para a

efetivação de uma Ciência mais comprometida com a transformação social. Os modelos alternativos ao positivismo ganharam força, particularmente na década de 80 do século passado, e muitas publicações que caracterizavam o "novo paradigma" surgiram, nas quais é possível perceber a influência das críticas dirigidas à ciência tradicional (ALVES-MAZZOTTI; GEWANDSZNAJDER, 1998).

Vários autores discutem os limites do paradigma científico moderno, impostos pelo rigor dos métodos experimentais. Sem dúvida, essa discussão evoluiu muito a partir de 1980, o que acabou por amenizar a polarização quantitativo/qualitativo e mostrar as diferenças internas entre as principais correntes que caracterizavam o qualitativo, deixando também a possibilidade para o diálogo entre ambas.

A crise da ciência moderna implicou em transformações paradigmáticas rumo a uma ciência pós-moderna, marcada por um movimento de "desdogmatização", que se manifestou ampliando horizontes de possibilidades (SANTOS, 2000). Para o autor, posturas científicas adequadas no âmbito da ciência pós-moderna seriam a crítica, o envolvimento livre e a capacidade de indignação. Outras características da ciência pós-moderna são apresentadas pelo autor: opera com galerias temáticas, mais do que com objetos estanques e rigidamente delimitados; é relativamente imetódica, no sentido de que se constitui por meio de uma pluralidade metodológica; inventa novos contextos persuasivos e novos estilos e gêneros de linguagem científica; admite a migração de conceitos e teorias entre os campos de saber; mobiliza a imaginação e investe na qualidade e exemplificação dos fenômenos estudados; teria na incerteza a chave da compreensão do mundo, que mais do que controlado, há de ser contemplado.

De certa forma, tais características indicam os limites do modelo unitário, aplicável a qualquer construção científica, em favor de um novo pensamento científico, que possibilitou a ampliação de possibilidades para interpretação da realidade. Nessa perspectiva, as pesquisas qualitativas e quantitativas, que antes eram vistas de forma dicotômica, podem agora se articular em benefício das análises delas resultantes. A subjetividade do pesquisador, bem como daqueles que estão envolvidos na pesquisa parte do princípio que se tornam dados importantes para interpretação dos resultados.

Alves-Mazzotti e Gewandsznajder (1998, p. 13) nos lembram que, "no momento em que as observações incorporam teorias falíveis, elas não podem ser consideradas como fontes seguras para se construir conhecimento e não podem servir como uma base sólida para o conhecimento científico, como pretendia o positivismo ingênuo".

6.1 A Vertente Qualitativa

Métodos qualitativos são, por vezes, tidos como mais atrativos, mais ricos, completos e mais globais que os quantitativos. Seu valor parece, aos olhos do leitor, muitas vezes, inquestionáveis (MILES, 1979, p. 590). No entanto, cabe lembrar que é preciso selecionar os dados de uma pesquisa, e os mais importantes são aqueles que melhor ajudam a compreender e interpretar o fenômeno. O autor alerta para o fato de que a tendência de buscar o 'ator principal' do fenômeno estudado pode resultar na perda de informações importantes. Assim, deve-se considerar a maior variedade possível de dados. Mesmo aqueles que, a princípio, parecem ser insignificantes podem contribuir para maximizar a confiabilidade dos resultados.

O pluralismo metodológico dentro do processo de pesquisa permite ir além dos rotineiros delineamentos dos dados levantados por poucos ou um único instrumento de pesquisa.

> O que é necessário é uma visão mais holística do processo de pesquisa social, para que ele possa incluir a definição e a revisão de um problema, sua teorização, a coleta de dados, a análise dos dados e a apresentação dos resultados. Dentre este processo, diferentes metodologias têm contribuições diversas a oferecer. Necessitamos de uma noção mais clara das vantagens e desvantagens funcionais das diferentes correntes de métodos, e os diferentes métodos dentro de uma corrente (BAUER; GASKELL, 2007, p. 26).

Pode-se afirmar que a pesquisa qualitativa é eminentemente exploratória e permite ao pesquisador tomar decisões ao longo do processo. Nessa perspectiva, não exige hipóteses prévias nem categorias rígidas de análise. De acordo com Suassuna (2004), o potencial dos dados concebidos numa abordagem qualitativa, que dê conta de responder às questões de pesquisa, não se revela diretamente ao pesquisador, portanto, reside na sua possibilidade de formular e reformular, sem a necessidade de uma comprovação formal quantitativa. Ainda de acordo com a autora, a não-transparência e a não-evidência da realidade exigem do pesquisador abertura e flexibilidade em termos de novas formulações. Assim, as hipóteses deixam de ter um papel comprobatório, para servir de balizadoras no confronto com a realidade estudada. Nessa perspectiva, é importante se atentar para o maior número possível de elementos presentes na situação estudada, visto que aspectos supostamente triviais podem ser essenciais para uma melhor compreensão da problemática, em processo de investigação.

Flick (2004) considera que a pesquisa qualitativa trabalha essencialmente com dois tipos de dados: a) os dados *verbais*, obtidos em entrevistas, narrativas, grupos focais; b) os dados *visuais*, obtidos em observações participantes, não-participantes, etnografia, análise de fotografias, de filmes.

Estes dados são transformados em textos por meio de sua documentação e transcrição, constituindo-se material empírico, que serão utilizados como substitutos para a realidade em estudo. Dessa forma, afirma Flick (2004, p. 27), "a documentação de dados não é simplesmente uma gravação neutra da realidade, mas uma etapa essencial da sua construção no processo de pesquisa qualitativa".

Embora a pesquisa qualitativa venha sendo largamente praticada, ainda encontra resistências na área das ciências da natureza, especialmente quando a preocupação, em vários contextos investigativos, é quantificar fatos e fenômenos.

O método qualitativo, no uso da linguagem para expressar ideias, precisa ser decodificado para que a análise seja feita e produza resultados significativos. Argumentos são expressos na forma de texto, de maneira que as diferenças de estilos, de contextos ou intenção de atribuir ao signo um caráter simbólico podem, a princípio, não ser captados pelo autor. O próprio texto deve ser objeto de análise, e a tarefa de analisar dados é extremamente habilidosa e individual e muita energia faz-se necessária para tornar os dados comparáveis.

Em sentido amplo, vários autores, dentre eles: Lüdke e André (1986); Triviños (1987); Luna (2000); Minayo (1994); Alves-Mazzoti e Gewandsznajeder (1998); Duarte (2002); Marconi e Lakatos (2007); Thiollent (1996); Flick (2004) compartilham aspectos gerais que caracterizam a pesquisa qualitativa, dentre os quais: o seu poder interpretativo, o emprego de métodos flexíveis e sensíveis ao contexto, considerando tanto a complexidade como os detalhes que possibilitam articular as conclusões que vão surgindo dos dados concretos com os conhecimentos mais específicos que respondem as questões de pesquisa. Na perspectiva desses autores, a vertente qualitativa mostra-se sob diversas ênfases e abordagens, apresentando abrangência suficiente para englobar as múltiplas variantes da realidade educacional e não se constitui obstáculo à construção de conhecimentos científicos.

> Uma pesquisa é sempre, de alguma forma, um relato de longa viagem empreendida por um sujeito cujo olhar vasculha lugares muitas vezes já visitados. Nada de absolutamente original, portanto, mas um modo diferente de olhar e pensar determinada realidade a partir de uma experiência e de uma apropriação do conhecimento que são, aí sim, bastante pessoais (DUARTE, 2002, p. 140).

O que parece relevante frente à complexidade dos fenômenos educacionais é a superação dos limites de cada método. Isso sugere articulações e complementações mais abrangentes do fenômeno em estudo.

6.2 Abordagem Etnometodológica

Numa pesquisa de cunho qualitativo, há várias abordagens de investigação e seus métodos diferem em suas *suposições teóricas,* no modo como compreendem *seu objeto* e em seu *foco metodológico*. As questões particulares afloram, possibilitando um universo de vários significados que não podem ser quantificados, tais como reflexões dos sujeitos, motivos, crenças, aspirações, atitudes, sentimentos e valores. Nessa perspectiva, Flick indica três posturas básicas:

> [...] a tradição do interacionalismo[8] simbólico, que trata do estudo dos significados subjetivos e das atribuições individuais do sentido; a etnometodologia, interessada nas rotinas do cotidiano e em sua produção; e as posturas estruturalistas ou psicanalistas, que partem de processos de inconsciência psicológica ou social (FLICK, 2004, p. 33).

De maneira geral, tais posturas, tomadas em seus aspectos globais, referenciam nossa pesquisa, contudo, salientamos que, da primeira, podemos destacar a questão dos significados e, da segunda, as produções do cotidiano, como fundamentais no processo de compreensão da forma como se dá a comunicação em sala de aula. Nessa perspectiva, articulações e complementações possíveis são feitas com vistas a superar os limites de cada método e, dessa forma, permitir interpretações mais abrangentes do fato em estudo.

As limitações próprias do interacionismo simbólico com relação aos pontos de vista dos sujeitos (as diferentes formas com as quais esses sujeitos revestem de significados os objetos, as experiências, os eventos, etc.) são superadas teórica e metodologicamente pela etnometodologia. Este termo designa uma corrente sociológica americana que surgiu no final

[8] O nome dessa linha de pesquisa sociológica ou sociopsicológica foi cunhado em 1938 por Herbert Blumer. Tem por foco processos de interação – ação social que se caracteriza por uma orientação imediatamente recíproca. As investigações desse processo baseiam-se em um conceito particular de interação que enfatiza o caráter simbólico das ações sociais (JOAS, 1987 apud FLICK, 2004).

da década de sessenta, tendo como principal fundador Garfinkel (1967). A publicação, em 1967, do seu livro *Studies Ethnomethodology* gerou debates intensos e conturbados[9] no meio acadêmico das universidades americanas e europeias, mas somente a partir de meados da década de oitenta passou a ser ensinada na França e seus trabalhos se propagaram nos anos de 1990, com um grupo de pesquisadores da Sociologia da Educação. No Brasil, essa abordagem é pouco explorada (COULON, 1995a).

A Etnometodologia é a escola cuja preocupação central é o "estudo dos métodos empregados por membros na produção da realidade na vida cotidiana", que a define como:

> Estudos que analisam as atividades cotidianas como métodos de membros destinados a tornar essas mesmas atividades visivelmente racionais e relatáveis a todos os propósitos práticos, ou seja 'explicáveis' [...]. A reflexibilidade desse fenômeno é um aspecto singular das ações práticas [...] (GARFINKEL, 1967, p. vii apud FLICK, 2004, p. 36).

Nesse sentido, e conforme já apontado, o pesquisador recorta a realidade, selecionando as informações significativas e necessárias para responder às questões da pesquisa.

> A realidade é entendida como algo que diz respeito a procedimentos, ou seja, uma realidade que é produzida localmente (naquele momento e local, no curso da ação), endogenamente (origina-se no interior da situação), audiovisualmente (no ouvir e no falar, no perceber e no agir), na interação pelos participantes (BERGMANN, 1980 apud FLICK, 2004, p. 36).

Considerando os recentes avanços da etnometodologia, suas posições teóricas e epistemológicas têm se restringido cada vez mais à análise formal das conversas. Desde a década de 80 do século passado, ganham espaço, os processos de trabalho em sentido amplo, especificamente no contexto do trabalho científico em laboratório. Nessa perspectiva, empregam-se vários métodos para a descrição do processo de trabalho, dos quais a análise de conversa é uma abordagem que reside em processos comunicativos e construtivos, nas

[9] O debate acerca da etnometodologia foi bastante conturbado, em especial por romper com a Sociologia clássica e também por sua obra ter sido publicada em pleno período de 'caótica convulsão nas Ciências Sociais', sobretudo nos Estados Unidos.

interações. Como alternativa, empregam-se diferentes tendências teóricas que possibilitam o acesso ao fenômeno estudado.

O ponto fundamental na perspectiva etnometodológica é que Garfinkel desconsidera a passividade reflexiva com relação às coerções externas. Para o autor, as normas estão presentes e os sujeitos interagem com elas. Outro ponto fundamental da crítica de Garfinkel (1967) se refere ao uso da linguagem. Na perspectiva da etnometodologia, os símbolos e códigos utilizados no processo de comunicação são produzidos na interação, por meio da interpretação das ações, com o intuito de produzir uma comunicação inteligível, predominando, portanto, o paradigma interpretativo.

De acordo com Flick (2004), avanços mais recentes com base na análise de conversas e dos estudos laboratoriais podem ser considerados os da psicologia social britânica[10]. Fenômenos psicológicos são estudados pela análise de discursos relevantes, que tratam de determinados tópicos. A ênfase é dada aos processos comunicativos e construtivos. Metodologicamente, consiste em analisar os repertórios interpretativos que os sujeitos utilizam para explicar e defender seus pontos de vista acerca de um evento qualquer.

Não é nosso objetivo aprofundar os conceitos acerca da distinção e pertinência da etnometodologia. Nossa adesão a esse tipo de pesquisa não significa que a consideramos melhor, acreditamos, contudo, ser mais significativo fazermos uso, neste momento, de uma abordagem qualitativa que valorize a comunicação, a interação em seus múltiplos aspectos.

Na afirmação de Guesser (2003, p. 160), "a linguagem que interessa aos etnometodólogos não é a linguagem culta, dos linguístas eruditos ou aquelas dos discursos estruturados, mas aquela do dia-a-dia, utilizada pelo cidadão comum, nas práticas do cotidiano".

6.3 Percurso Analítico

A metodologia não se restringe a procedimentos técnicos de coleta de dados e informações, mas um conjunto de passos que gera dados relevantes. É importante explicitar os meios de transformação dessas informações em dados, porque deles vão depender as respostas possíveis às questões da pesquisa. Sobre essa questão, Deslandes (1994) também é de opinião que, mais do que um conjunto formal de regras e técnicas, a metodologia deve indicar as opções sobre as quais o pesquisador deve se orientar, tendo como pressupostos o referencial teórico adotado.

[10] Ver Edward e Potter (1992); Harré (1994, 1998); Harré e Stearns (1995).

Minayo (1994) complementa essa ideia propondo que sejam feitos cotejos e confrontos entre as abordagens teóricas e o que se pretende como contribuição para a pesquisa.

Lüdke e André (1986) lembram que os dados não se revelam simplesmente aos olhos do pesquisador. Antes, porém, é preciso selecioná-los, sendo que os mais importantes são aqueles que, de fato, ajudam na interpretação e análise, portanto, na compreensão do fenômeno em estudo. Flick (2004, p. 63-64) observa que a "formulação de questões de pesquisa, em termos concretos, é guiada pelo objetivo de esclarecer o que os contatos do campo vão revelar". Assim, refletir sobre a questão de pesquisa e reformulá-la até torná-la relevante para responder as proposições do pesquisador são pontos fundamentais que devem ser considerados. O autor propõe que a questão de pesquisa seja claramente formulada pelo pesquisador e pondera que o mesmo deve permanecer aberto a novos e surpreendentes resultados. Essa postura implica discernimento em termos de verificar se as decisões metodológicas são apropriadas nos aspectos que seguem: *quais os métodos necessários para responder às questões? É realmente possível estudar a questão de pesquisa com os métodos escolhidos? A pesquisa qualitativa seria a estratégia adequada para responder a essas questões?*

Uma das inconveniências do método científico tradicional, conforme Certeau (1999) é a abstração de dados e documentos de seu contexto histórico. Trata-se de um recorte necessário, sobretudo nas ciências da natureza, com o objetivo de lidar com as práticas científicas sem turbulências. No caso de estudos que envolvem a comunicação oral e escrita, esse recorte tem implicações nos processos que envolvem as práticas cotidianas, visto que anula as operações dos locutores da forma como ocorrem.

Pérez Gómez (1998) concorda que uma problemática que se deve considerar é a dificuldade em comunicar as ideias fundamentadas no conhecimento científico. De Longhi (2000) também nos faz refletir sobre a linguagem científica como fator que influencia no processo de comunicação.

A utilização de diferentes formas de coleta de dados é chamada de triangulação e assegura maior confiabilidade nos dados obtidos. Nessa perspectiva, uma idéia expressa por um sujeito da pesquisa pode ser recorrente em diferentes instrumentos de investigação. Os dados sobrepostos permitem maior segurança na análise. De acordo com Flick (2004), "a triangulação pode significar a combinação entre diversos métodos qualitativos", daí que a pertinência de buscarmos diferentes maneiras para investigar um mesmo aspecto. Além disso, é fundamental para o pesquisador, refletir sobre que postura adotar frente à variedade de posições teóricas, de maneira que o critério de credibilidade seja considerado. Por se tratar de características complexas, a validação dos resultados em pesquisas qualitativas, muitas vezes

é questionada. No entanto, há na literatura, vários autores que tratam da validação em tais pesquisas.

Alves-Mazzotti e Gewandsznajder (1998, p. 173), admitem a triangulação como critério de credibilidade em situações em que a pesquisa gera um volume grande de dados que precisam ser organizados e compreendidos, sejam eles, de fontes, de métodos, de investigadores e de teorias. Flick (2004), também sugere a triangulação de observações com outras fontes de dados, com a finalidade de intensificar a expressividade dos dados reunidos. Cohen e Manion (1980) e Denzin (1989) sugerem a triangulação como forma de garantir a validade interna, a credibilidade e a autenticidade dos dados investigados.

O conceito triangulação[11] vem do interacionalismo simbólico e foi desenvolvido por Denzin (1989) para indicar a combinação e o cruzamento de: múltiplos pontos de vista; tarefa conjunta de diferentes pesquisadores; emprego de uma variedade de técnicas de coleta de dados para o trabalho de investigação. Seu uso, na prática deve possibilitar a interação, a comparação e a crítica intersubjetiva.

Denzin (1989) propõe quatro tipos triangulação, a chamada *triangulação de dados*; a *triangulação do investigador; a triangulação da teoria* e a *triangulação metodológica* formam um conjunto de estratégias que contribuem no sentido de evitar ameaças à validade dos dados coletados. A triangulação foi concebida, inicialmente, como estratégia de validação de métodos individuais, entretanto, o foco tem se deslocado cada vez mais na direção de complementar o conhecimento e na de transpor o potencial epistemológico, quase sempre limitado de tais métodos. Não se trata de avaliar os resultados, mas de embasar e ampliar, ainda mais, as possibilidades de elaboração dos conhecimentos. De acordo com Flick (2004, p. 238), "representa mais uma alternativa que – amplia o escopo, a profundidade e a consistência nas condutas metodológicas – do que uma estratégia para validar resultados e procedimentos".

Adotamos a chamada triangulação metodológica, que segundo os autores é representada por uma variedade de instrumentos de pesquisa e de registros na utilização de diversos métodos de estudo, para um único objeto de pesquisa. A triangulação teórica se refere ao uso de mais de um arcabouço teórico para orientar a contextualização do estudo e a interpretação dos dados. Vários autores tratam essas formas de triangulação como sinônimas de designação mais ampla de métodos mistos. Assim sendo, nossa opção pela triangulação de

[11] O termo triangulação teve sua origem na psicologia por Campbell e Fiske (1959) que se propuseram completar ou testar empiricamente os resultados obtidos utilizando diferentes técnicas quantitativas e foi retomado por Denzin em 1989. Ver Tashakkori e Teddlie (1998).

métodos, aborda também pressupostos da triangulação teórica, e se refere à convergência ou corroboração de dados que podem contribuir significativamente para diminuir a influência do pesquisador, no resultado da análise.

Com base no exposto, apoiamo-nos em alguns pressupostos da pesquisa qualitativa como norteadora do processo de investigação. Além dos aspectos epistemológicos dos conhecimentos específicos pertinente à pesquisa, nossa problemática está centrada especificamente na dificuldade que os estudantes de ensino superior apresentam em comunicar conhecimentos científicos para explicação de fatos e fenômenos. Assim, buscamos na análise do discurso uma forma de compreender os significados que domina a discursividade, como forma de colocar em evidência fatores que podem contribuir para que a aplicação do conhecimento científico seja mais eficaz.

6.4 Alguns Pressupostos Teóricos da Análise do Discurso

A Análise de Discurso francesa[12] tem suas origens com o filósofo francês Michel Pêcheux, na década de 1960. Foi elaborada como uma técnica de análise, mas seu viés metodológico permitia vislumbrar as bases teóricas na realização de pesquisas na área social daquele momento.

Passemos, agora, a alguns pressupostos teóricos que embasam a Análise do Discurso (que abreviaremos AD). Assim, nos embasamos nos trabalhos de Pêcheux e seguidores, e elegemos alguns aspectos que nos permitem buscar especialmente os sentidos das diferentes formas discursivas encontradas no processo investigativo, e que permitem também considerar, de alguma forma, os esquecimentos, os silêncios e as lacunas. Cabe lembrar que não se trata, neste estudo, de trazer à tona concepções de linguística da fala e linguística da língua como sistema fechado, governado por regras. Apoiamo-nos na AD que amplia a possibilidade de análise da língua, tomando como seu objeto o discurso aqui entendido como "efeito de sentidos entre interlocutores". Orlandi (2003), em seus trabalhos, retoma Pêcheux e defende o discurso como palavra em movimento. Para além da linguística clássica, interessa nessa abordagem tirar proveito da fluidez do discurso, da alteridade do sujeito, de explicar como os sentidos são produzidos.

[12] Ao mencionarmos Análise de Discurso neste trabalho, estaremos nos referindo àquela de linha francesa que fundamenta-se nos trabalhos de Pêcheux.

Concebe-se a Análise do Discurso da linha francesa como um modelo metodológico que, segundo Maingueneau (1989), surgiu associada a uma tradicional prática escolar francesa: a explicação de textos. Trata-se, portanto, de uma metodologia que, ao privilegiar a interdisciplinaridade, articula pressupostos teóricos da Linguística, do Materialismo Histórico e da Psicanálise. São, portanto, diferentes possibilidades de compreensão de um mesmo problema, apresentado por autores diferentes. Isso significa que não há uma teoria mais aceita atualmente, mas caminhos teóricos que respondem e correspondem, em parte, às necessidades de reflexão que se apresentam. Maingueneau (2005) admite que a noção de discurso seja empregada com acepções muito diferentes, desde as mais restritas até as mais abrangentes.

> O mesmo ocorre com a expressão 'análise do discurso', para alguns coincide simplesmente com 'análise de texto'. Em uma primeira aproximação, na perspectiva da 'escola francesa de análise do discurso', entenderemos por 'discurso' uma dispersão de textos cujo modo de inscrição histórica permite definir como um espaço de regularidades enunciativas (MAINGUENEAU, 2005, p. 15).

Dessa forma, o autor concebe o discurso como modo de apreensão da linguagem, empregado como a atividade de sujeitos inscritos em contextos determinados, portanto, procura descrever e analisar os sentidos e suas condições de produção. Para além da dicotomia saussureana[13], o discurso "é fruto do reconhecimento de que a linguagem tem uma dualidade constitutiva e que a compreensão do fenômeno da linguagem não deve ser buscada apenas na língua, sistema ideologicamente neutro, mas num nível situado fora do polo de dicotomia língua / fala" (PÊCHEUX, 1997).

A Análise do Discurso amplia a possibilidade de análise da linguagem como sistema fechado. Tal ampliação define o discurso como objeto de análise, tomado como prática sócio-histórica, trabalho simbólico, parte da produção social mais geral como afirmam Maingueneau (1996) e Orlandi (1998). Assim, o discurso é a prática social, tomado como palavra em movimento, como forma de abordagem que considera os processos de constituição do fenômeno linguístico e dos sentidos aí engendrados. Discurso é a prática social de produção de textos. Isto significa que todo discurso é uma construção social, portanto, não é individual e sua análise implica levar em conta seu contexto histórico/social, ou seja, suas

[13] Análise da língua, enquanto sistema fechado, governado por regras e sistematicidade, perspectiva criada a partir do corte epistemológico de Saussure, fez da fala o lugar do acaso, da heterogeneidade, algo fora do domínio da linguística.

condições de produção. Assim sendo, o discurso reflete uma visão de mundo determinada, necessariamente vinculada à do seu autor e à da sociedade em que vive. Sua análise é justamente o trabalho de compreender quem diz, como se diz, em quais circustâncias se diz, portanto, preocupa-se com o que está além das evidências, buscando sua significação.

> A relação com o simbólico é uma relação com a interpretação. Ela está na base da própria constituição do sentido. Diante de qualquer objeto simbólico, o sujeito é instado a interpretar, a dar sentido. E o faz determinado pela história, pela natureza do fato simbólico, pela língua. Aí está o princípio mesmo da ideologia: não há sentido sem interpretação, mas este processo de constituição de sentido (sua historicidade) não é transparente para o sujeito. Ao contrário, é através de um processo imaginário que o sentido se produz no sujeito na relação que interliga linguagem/pensamento/mundo. A interpretação (a ideologia) é assim necessária: não há discurso sem sujeito nem sujeito sem ideologia (ORLANDI, 1997, p. 26).

O texto é o produto da atividade discursiva. Como já referido, o objeto empírico da AD é o discurso, a construção sobre a qual se debruça o analista para buscar, em sua superfície, as marcas que guiam a investigação científica. Ao utilizarmos o referencial da AD, o texto passa a ser o objeto de investigação, não importando o seu tamanho, como destaca Orlandi (1996a, p. 136): "Enquanto unidade pragmática que se constitui na interlocução, não importa a extensão do texto: pode ser uma palavra, um sintagma, um conjunto de frases (escrito ou oral), o que importa é que funciona como unidade de significação em relação à situação".

Nessa perspectiva, trata-se, portanto, de explicar como os sentidos são produzidos e não buscar o sentido do texto. Para Cardoso (2005, p. 36), "o texto é a manifestação verbal do discurso, o que equivale a dizer que os discursos são lidos e ouvidos sob a forma de texto. Um discurso é normalmente constituído por uma pluralidade de textos, ao mesmo tempo, cada texto é permeado de vários discursos".

Da mesma forma, o indivíduo também não é mais aquele que fala, que pronuncia, que escreve, mas aquele que procura significar o discurso como unidade e origem , considerando suas significações.

> [...] não se trata de transmissão de informação apenas, pois no funcionamento da linguagem, que põe em relação sujeitos e sentidos afetados pela língua e pela história, temos um complexo processo de constituição desses sujeitos e produção de sentidos e não meramente transmissão da informação [...]. As relações de linguagem são relações de sujeitos e de sentidos e seus efeitos são múltiplos e variados (ORLANDI, 1999, p. 21).

Num processo de formação discursiva, o sujeito, ao posicionar-se, está legitimando um discurso que não é dele. O efeito da neutralidade relaciona-se ao que Pêcheux (1988) chamou de esquecimento número um, também chamado de esquecimento ideológico.

> O esquecimento nº. 1 é de natureza inconsciente e ideológica, o sujeito se coloca como origem do que diz, a fonte exclusiva do sentido do seu discurso [...] o sujeito rejeita, apaga inconscientemente qualquer elemento que remeta ao exterior de sua formação discursiva. [...]. Nesse processo de apagamento, o sujeito tem a ilusão de que ele é o criador absoluto de seus discursos (PÊCHEUX, 1988, p. 173).

Para Pêcheux (1988), O interdiscurso é o conjunto do dizível, histórico e linguisticamente definido, e reside no fato de que algo fala sempre antes e independentemente, sob a dominação do complexo de formações ideológicas.

O esquecimento nº 2 está no nível do pré-consciente e significa que o sujeito tem possibilidades de reformular o esquecimento, no entanto, ele assume a forma constituída como única, verdadeira. Outra forma de abordar a questão do esquecimento na AD é por meio da noção de heterogeneidade. Essa forma permite mostrar as marcas do "outro discurso", evidenciando que todos os discursos são atravessados por outros discursos, consequentemente permeados de "outros sentidos".

As diferentes formações discursivas indicam que o sujeito é ideologicamente heterogêneo, portanto, muitas vezes contraditório, ao trabalhar também a noção de *interdiscurso* e *pré-construído*, buscando na memória do discurso as marcas das formações discursivas. Como pré-construído se entende os fenômenos discursivos não identificáveis do texto, traços apagados de outro discurso, não ditos, mas inscritos no interior do discurso que se sustenta.

Outra noção fundamental para nossa análise é a do silêncio. Para que as palavras possam significar, é preciso buscar no silêncio formas de estabelecer uma relação com a realidade. É por meio da significação do silêncio que ocorre o deslizamento dos sentidos produzindo outros efeitos.

O homem, ao falar, materializa sua história. Em outras palavras, há uma relação necessária entre a linguagem e o contexto de sua produção. Assim, a linguagem, pelos processos de interação e interlocução, é concebida como elemento fundamental na constituição e desenvolvimento do homem. Os sentidos não são apeendidos, mas se caracterizam por meio de gestos de interpretação, inconscientemente, e carregam aspectos da

ideologia, na relação da língua com a história. (PÊCHEUX (1997). Assim, a linguagem para a AD é produto do trabalho social e histórico dos homens, num processo de interação social/verbal, mediação que age e transforma. É por meio dela que se estabelece uma relação permanente com a realidade natural e social. Concebemos aqui, tal como Orlandi (1996a), o discurso como o local em que as práticas sociais são materializadas na linguagem, uma vez que o discurso dispõe de formas de apropriação pelo indivíduo falante, do universo da língua, implicando a participação do sujeito na linguagem. Nesta relação, linguagem e sociedade se constituem mutuamente num processo conflituoso e contraditório. Desta forma, a linguagem deixa de ser considerada apenas "meio de comunicação", instrumento utilizado com o objetivo de comunicar e transmitir informações, passando a ser considerada como mediação, como processo de produção de sentidos.

> [...] esta possibilidade de movimento, deslocamento de palavras entre presença e ausência produz uma relação fundamental entre a linguagem e o tempo, um ritmo entre o dizer e o silêncio, característica de todo processo de significação. Existe uma temporalidade da significação que implica uma relação entre o dizer e o não dizer (ORLANDI, 2001, p. 128).

Ao falar em silêncio nos remetemos à noção de interpretação, uma vez que o sentido está sempre em curso, nunca se fechando, não tendo um início e um fim. Todo enunciado pode tornar-se outro, deslocando-se discursivamente seu sentido, dando lugar a interpretações, organizando as filiações históricas em memórias e as relações sociais em redes de significantes. Segundo Orlandi (1993), há várias formas de silêncio: o *silêncio fundador,* necessário aos sentidos, que significa o não dito; o *silêncio constitutivo*, que nos indica que para dizer é preciso não dizer, e que o dizer apaga necessariamente outros sentidos, produzindo um silêncio entre eles.

Pêcheux, em seu último texto publicado: *O Discurso – Estrutura e Acontecimento*, desenvolve a ideia de interpretação na análise do discurso como ato contínuo discursivo, em que o sujeito, ao interpretar, faz o corte para o lugar do acontecimento. Orlandi desdobra a noção de Pêcheux na seguinte passagem:

> Quando o sujeito fala, ele está em plena atividade de interpretação, ele está atribuindo sentido às próprias palavras em condições específicas. Mas ele o faz como se o sentido estivesse nas palavras: apagam-se suas condições de produção, desaparece o modo pelo qual a exterioridade o constitui. A interpretação aparece para o sujeito, como transparência, como o sentido [...] (ORLANDI, 2004, p. 65).

Na relação com nossa temática, a questão da interpretação se coloca diretamente vinculada ao modo pelo qual o sujeito, nas suas diferentes relações, produz o seu texto. Orlandi (2005) concorda com essa ideia e reitera que o sujeito interpreta (dá sentido), diante de qualquer objeto simbólico, por meio da história, da natureza do objeto e da língua, portanto, o sentido só se constitui pela interpretação. Cabe enfatizar que o processo de constituição dos sentidos não é transparente para o sujeito, ao invés disso, é mediante um processo imaginário que os sentidos são produzidos no sujeito, na relação que interliga linguagem, pensamento e mundo.

Como já enfatizado, utilizamos a Análise do Discurso (AD), tal como proposta por Michel Pêcheux e retomada por Orlandi (1993), como dispositivo teórico principal. Contudo, procuramos trazer outros teóricos que fundamentam o processo de comunicação professor/estudantes. Esta opção teórico-metodológica se caracteriza por uma perspectiva que procura descrever e analisar os sentidos e suas condições de produção, ou seja, busca explicitar, no discurso, os processos de significação. Trata-se de uma teoria crítica que apresenta uma concepção de história não como uma somatória de dados, mas como resultante de fatores sociais que reclamam sentidos, produzem e redimensionam novos sentidos, valores e comportamentos entre as pessoas, sendo a linguagem, o processo discursivo, seu elemento constitutivo.

Ainda no contexto da Análise do Discurso, mas transitando em campos da Análise do Conteúdo, buscamos a Análise Textual Discursiva discutida por Moraes e Galiazzi (2007, p. 112), "[...] entendida como o processo de desconstrução, seguido da reconstrução, de um conjunto de materiais linguísticos e discursivos, produzindo-se a partir disso, novos entendimentos sobre os fenômenos e discursos investigados".

A Análise Textual Discursiva, para Moraes e Galiazzi (2007), apresenta-se como modalidade de investigação. Embora se encontre no domínio da Análise do Discurso e da Análise do Conteúdo, apresenta características que muitas vezes fogem dos pressupostos principais desses dois referenciais, colocando-se entre ambos.

6.5 Análise Textual Discursiva

A combinação entre diversos métodos qualitativos permite diferentes maneiras de investigar um mesmo aspecto. Além disso, é fundamental para o pesquisador refletir sobre

que postura adotar frente à variedade de posições teóricas, de maneira que o critério de credibilidade seja considerado.

Moraes e Galiazzi (2007) nos fazem refletir sobre esse procedimento investigativo, apresentando características que nos permitem inseri-lo tanto no movimento da Análise de Conteúdo, como no de Análise do Discurso. Interessa-nos, neste recorte, o aspecto simbólico de enfoque interpretativo e descritivo, já que, pela Análise do Discurso, a preocupação analítica não se configura prioridade e a tendência é ir diretamente da superfície textual ao nível interpretativo. A preocupação fundamental é a interpretação, portanto, a descrição é secundária e, de certa maneira, dispensável.

Os autores discutem um conjunto denominado por eles "seis polarizações" com a finalidade de situar a Análise Textual Discursiva em relação à Análise do Discurso e a Análise do Conteúdo. Recortamos, para efeito de nossa reflexão, as características fundamentais que as diferenciam e que validam tal tendência.

1 - Descrição e interpretação: preocupação analítica ou interpretativa?

Para a Análise de Conteúdo, importa tanto os níveis descritivos como os interpretativos, já a Análise do Discurso centra sua preocupação na interpretação, especialmente aquela de natureza crítica. Não significa, contudo, que a descrição seja desprezível. É fundamental entender que as duas focalizam a interpretação como momento indispensável.

A Análise Textual Discursiva, nesse contexto, de acordo com Moraes e Galiazzi (2007, p. 145), apresenta-se mais próxima da Análise de Conteúdo, "sua interpretação tende principalmente para a construção ou reconstrução teórica, numa visão hermenêutica, de reconstrução de significados, a partir das perspectivas de uma diversidade de sujeitos envolvidos nas pesquisas".

2 - Compreensão e crítica: exercícios complementares?

A intenção de compreender um determinado fato ou fenômeno se revela em todas as modalidades metodológicas, no entanto, para a Análise do Discurso, não se constitui foco principal. Moraes e Galiazzi (2007), citando Habermas, comentam que, por esta via, exige-se um olhar externo já que prioriza a perspectiva crítica. Dessa forma, a Análise do Discurso é crítica e transformadora, enquanto a Análise de Conteúdo é compreensiva e interpretativa. Nesse aspecto, a Análise Textual Discursiva se coloca mais na perspectiva da Análise de Conteúdo, de construção e reconstrução de compreensões.

3 - Manifesto ou latente: tudo é interpretação?

Nesse enfoque, a Análise do Discurso concentra-se preferencialmente no latente, fazendo dele o objeto de interpretação e crítica. As duas abordagens podem assumir os diferentes papéis na análise de conteúdos implícitos, no entanto, a Análise de Discurso tende a desvelar o oculto, propondo uma exploração mais crítica do fenômeno. De acordo com Moraes e Galiazzi (2007, p. 149): "Análise Textual Discursiva fundamenta-se na hermenêutica, inicia seus esforços de construção de compreensão a partir dos sentidos mais imediatos e simples dos fenômenos que pesquisa". Cabe lembrar que esse tipo de análise vai além da hermenêutica, sua modalidade de análise envolve exercícios de produção de sentidos mais complexos e aprofundados, combinando, assim, a hermenêutica e a dialética.

4 - Fenomenologia, Hermenêutica e Etnografia x Dialética: exame dos fenômenos de dentro ou de fora?

O enfoque interpretativo se mostra potencialmente útil por ser progressivo. Nessa perspectiva, ao longo do processo investigativo serão produzidas sucessivas definições de análise e focalização de dados, conforme vai se evidenciando sua relevância para o debate sobre o tema em questão.

Com relação ao termo descritivo, Moraes e Galiazzi (2007, p. 143) citam Martins e Dichtchekenian, que "consideram os níveis descritivos e interpretativos como forma de se apresentar os resultados da análise, formas de explicitar uma nova compreensão de um fenômeno".

Nessa perspectiva, a Análise de Conteúdo, ao trabalhar com categorias emergentes, valoriza o sujeito e a manifestação dos fenômenos, evidenciando de certa maneira o exercício de atitudes fenomenológicas. Embora não caiba nesta discussão, vale lembrar que "Análise do Discurso tem suas raízes no materialismo histórico e na dialética marxista" (MORAES; GALIAZZI, 2007, p. 150).

No que tange à concepção de realidade em constante transformação, a Análise de Conteúdo vem, nos últimos anos, gradativamente assumindo pressupostos da lógica dialética, característica essencialmente preconizada pela Análise de Discurso.

De igual forma, a Análise Textual Discursiva, embora de característica hermenêutica, relaciona-se com a fenomenologia e a etnografia, contudo, sua tendência de assumir perspectiva transformadora aproxima-a da tendência dialética.

5 - Partes e todo: o todo é acessível? É valido examinar as partes dentro do todo?

Visto pela ótica da pesquisa qualitativa, a fragmentação esbarra na problemática dos limites e do alcance desses recortes da realidade. As abordagens de

natureza qualitativa têm procurado superar a fragmentação para efeito de investigação, no entanto, toda análise pressupõe, de alguma forma, evidenciar a parte e, portanto, lida frequentemente com a fragmentação. Como então lidar com essa realidade sem perder as interações, relações significativas e representativas que aí se dão?

Os autores concordam que, num processo de investigação, quando se estabelecem categorias, põem-se em evidência as partes que pretensamente sejam representativas do todo. Nessa perspectiva, sugerem trabalhar as partes utilizando um movimento dialético de forma a ampliar a compreensão do todo. Ainda argumentam Moraes e Galiazzi (2007, p. 152), "as categorias são componentes da própria linguagem. Só podemos expressar-nos em relação à realidade por meio das categorias construídas na linguagem. Por isso, as representações lingüísticas são sempre necessariamente parciais e de algum modo fragmentadas".

Em relação às abordagens norteadoras desta discussão, notamos que ambas admitem a categorização, no entanto, trata-se de um procedimento mais utilizado na Análise de Conteúdo. Na análise de Discurso, as categorias passam a ser vistas como maneira de dar ênfase à alguma parte, visando melhorar a compreensão do todo. Como já destacado, deve haver sempre um esforço no sentido de atingir uma compreensão mais global dos fenômenos estudados.

Como nas demais características, a questão do todo e das partes também coloca a Análise Textual Discursiva num espaço intermediário entre as outras abordagens. É fundamental salientar que as compreensões assumidas na modalidade Análise de Discurso devem ser expressas na linguagem, daí a tendência de perceber "[...] seus objetos de pesquisa como discurso e não como fenômenos ou conceitos isolados" (MORAES; GALIAZZI, 2007, p. 156).

6 - Teorias Emergentes e Teorias a Priori: é possível ver sem teoria?

Ao apresentar as características dessa última polarização, Moraes e Galiazzi (2007) admitem que a Análise de Discurso se estrutura em torno de teorias escolhidas *a priori*, enquanto a Análise de Conteúdo opera tanto com teorias *a priori* como com teorias *emergentes*. O primeiro modo concebe a teoria como norteadora, e é explicitada pelo pesquisador desde os primeiros movimentos em relação ao processo investigativo. No segundo modo, a teoria emerge a partir da investigação, por meio de conhecimentos implícitos que se manifestam, por exemplo, das falas e discursos dos sujeitos da pesquisa, em abordagens de cunho fenomenológico, etnográfico e hermenêutico (STRAUSS, 1987 apud MORAES; GALIAZZI, 2007).

Escolher uma ou outra abordagem como norteadora da pesquisa vai depender dos pressupostos epistemológicos e metodológicos da pesquisa. Pelo exposto, a Análise Textual

Discursiva, de natureza hermenêutica, identifica-se mais com as teorias emergentes, que, para Moraes e Galiazzi (2007, p. 159), são "[...] movimentos de teorização que se originam nas manifestações discursivas dos sujeitos das pesquisas". A discussão feita por esses autores possibilita evidenciar que a abordagem denominada Análise Textual Discursiva se insere entre a Análise do Discurso e a Análise do Conteúdo, e as três encontram-se num único domínio, a Análise Textual. Ao mostrar as principais características que as diferenciam, os autores expõem também algumas aproximações e superposições.

Considerando, portanto, o reconhecimento da importância que a linguagem e o discurso já alcançaram no ensino e aprendizagem em ciências, a Análise do Discurso, nesta pesquisa, foi o referencial de análise adotado como principal, por possibilitar uma compreensão mais significativa do fenômeno investigado, bem como a intencionalidade das ações desenvolvidas.

Com base no exposto, apoiamo-nos em alguns pressupostos da pesquisa qualitativa como norteadora do processo de investigação. Além dos aspectos epistemológicos dos conhecimentos específicos pertinentes à pesquisa, nossa problemática está centrada especificamente na dificuldade que os estudantes de ensino superior apresentam em comunicar conhecimentos científicos para a explicação de fatos e fenômenos. Assim, buscamos, na análise do discurso, uma forma de compreender os significados que dominam a discursividade, como forma de colocar em evidência fatores que podem contribuir para que a aplicação do conhecimento científico seja mais eficaz.

6.6 Corpus da Pesquisa

A estrutura analítica proposta baseia-se em descrever, interpretar e explicar o comportamento de três entidades bastante conhecidas no mundo físico, partículas, ondas e elétrons. A categorização das intervenções do docente e dos estudantes foi adaptada de autores como De Longhi (2000) e Pérez Gómez (1998). Nossa intenção, ao privilegiar esses aspectos, foi contribuir para que as interações em situações de ensino/aprendizagem resultem em momentos significativos de construções nas aulas de ciências. Para interpretação e análise da comunicação oral e escrita que se deu durante o desenvolvimento da atividade, pautamo-nos em Orlandi (1993, 1996a, 1996b, 1997, 1998) e retomamos Pêcheux (1997) e Moraes e Galiazzi (2007). Buscamos,

então, os efeitos do engajamento dos estudantes e professor, sujeitos do processo, como forma de ampliar e significar as argumentações acerca dos conhecimentos em estudo.

Numa pesquisa de natureza qualitativa, conforme Duarte (1998) e Deslandes (1994), o que importa na construção do *corpus* é sua representatividade, sua pertinência e a qualidade, no sentido de abranger o problema investigado, se não na sua totalidade, pelo menos em várias de suas dimensões.

O objeto da investigação educacional é um complexo sistema simbólico, que se dá num espaço institucional determinado, de modo que o conteúdo e as formas de pensar, sentir e agir dos sujeitos envolvidos são, necessariamente, afetados por essas redes moventes de significados, a interpelação problematizadora dos dados (mais do que propriamente sua divulgação) (SUASSUNA, 2004, p. 174).

O pesquisador não se limita, em princípio, a comprovar hipóteses, mas procura ampliar os objetivos, tomando os acontecimentos em sua complexidade, questionando sobre eles com liberdade e flexibilidade. As elaborações, nessa perspectiva, são sempre provisórias e tomadas como possibilidades de busca. Disso se pode extrair que todos os resultados, previstos ou não, devem ser levados em conta, como informações potencialmente úteis para interpretar e compreender a complexidade educacional.

Pérez Gómez (1998, p. 175) afirma que os acontecimentos anômalos e imprevistos, as variáveis ou fatores estranhos são sempre bem vindos, já que o objetivo prioritário dessa estratégia não é construir teorias consistentes e organizar sua comparação, mas mergulhar na complexidade do mundo real do caso concreto que queremos estudar, bem como refletir sobre as observações, os registros, as informações e as perspectivas dos envolvidos, recolhidos pelas mais diversas técnicas. “Tais fatos emergentes são ocasiões de ‘ouro’ para compreender o funcionamento da realidade, já que alteram a rotina e põem a descoberto conflitos, interesses, necessidades e comportamentos habitualmente ocultos e soterrados” (PÉREZ-GOMES, 1998, p. 106).

Como já destacado em momentos anteriores, a metodologia não se reduz a procedimentos de coleta de dados e informações, mais do que isso, é fundamental explicitar os meios que norteiam a investigação, segundo os quais as informações se transformam. Thiollent (1991) também defende que a metodologia não deve ser entendida como determinado número de regras operacionais, mas como um amplo conjunto de conhecimentos, sobre o qual o pesquisador se vale para desenvolver sua investigação. Flick (2004, p. 283) nos lembra “que não faz sentido defender a idéia de que um método específico deva ser

empregado na pesquisa qualitativa como o correto e o único. [...] a pesquisa deve ser planejada metodologicamente e baseada em princípios e na reflexão".

Portanto, dificilmente se pode compreender a pesquisa qualitativa mediada apenas em um nível teórico. Partindo da reflexão proposta por Suassuna (2004), consideramos alguns aspectos de procedimentos da pesquisa que, em sentido amplo, se levados a efeito, devem possibilitar a indagação da produção e trocas de significados e consistem em:

a) reconsiderar as etapas de desenvolvimento da pesquisa e modificá-las de acordo com a situação do estudo;
b) refletir sobre a escolha dos métodos específicos de coleta de dados;
c) planejar cuidadosamente sobre as formas de documentar os registros dos dados e das experiências de pesquisa;
d) refletir sobre os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa;
e) planejar atentamente sobre o método ou métodos de análise de dados.

Desse modo, diante da complexidade que o contexto impõe, os aspectos observados por Suassuna também são fundamentais e contribuem na busca de dados considerados relevantes para responder a questão de pesquisa.

Os procedimentos de pesquisa devem possibilitar a problematização dos dados, a indagação da produção e a troca de significados. Nessa perspectiva, Pérez Gómes (1998) defende o enfoque interpretativo, por ser progressivo. Assim sendo, ao longo do processo investigativo, vão sendo produzidas sucessivas definições de análise e focalização dos dados.

A pesquisa que realizamos está centrada na análise da comunicação dialógica professor/estudantes. O objeto de conhecimento científico é a comunicação verbal e escrita acerca da compreensão do comportamento das entidades físicas listadas anteriormente (partículas, ondas e elétrons), no momento de sua interação com sistemas que contêm uma e duas fendas, visando a compreensão de fenômenos que ocorrem em nível clássico e quântico. Nessa perspectiva de trabalho, não privilegiamos um método específico de coleta e análise dos dados. Estes foram estudados ora em seus aspectos globais, ora parciais, ora com ênfase nas intenções, ora com ênfase nos acertos, ora nos erros. No contexto da etnometodologia, usamos a metodologia interpretativa de um estudo de caso e utilizamos, como referencial, categorias de análise que consideram aspectos das estruturas propostas por De Longhi (2000) e Galagovski et al. (2003), bem como os princípios da representação mental defendidos por Johnson-Laird (1983).

6.6.1 Desenvolvimento empírico

A proposição de alternativas didáticas, que possibilitem a interação professor/estudantes com conteúdos e atividades passíveis de transpor os diferentes saberes do científico ao saber ensinado, pode resultar em um bem sucedido processo de ensino.

Diante da impossibilidade de controlar e analisar boa parte das variáveis presentes no desenvolvimento das atividades, especial ênfase foi dada ao registro cuidadoso das interações verbais. Dos registros feitos no desenvolvimento das atividades, foram extraídas sequências representativas da comunicação, destacando: a) a ênfase na fala do professor; b) a ênfase na fala do aluno; e c) a ênfase na interação professor-alunos.

Assim, o fundamental na atividade analisada é a forma como o professor age e como o aluno se relaciona com o conteúdo e responde às questões de pesquisa ao fazer uso das estratégias sugeridas. Um segundo aspecto que se pretende com a pesquisa é fornecer um panorama do processo que possa servir de reflexão para aprimorar as interações em sala de aula, visando construções mais significativas de saberes.

6.6.2 Estratégia de trabalho

No campo da física, sobretudo, e em outras áreas do conhecimento, alguns experimentos são impossíveis de serem realizados em laboratórios físicos, então, concluir os resultados que se obtêm desse tipo de experimento é uma coisa que só pode ser feita à medida que nós o pensamos. Ao aplicar os conhecimentos científicos necessários à determinada situação, podemos prever o resultado, ou seja, antecipar esse resultado. Ainda que o experimento não possa ser feito, nós fazemos o uso dos experimentos mentais em diversas situações.

A ideia, nesta atividade, é discutir o uso de experimentos mentais em função de ganho significativo na compreensão de conhecimentos científicos. Nessa perspectiva, inicialmente, fizemos uso de experiências antecipatórias com partículas e ondas, interagindo com sistemas que continham uma e duas fendas, e finalizamos a atividade levando em conta um experimento que, por muito tempo, permaneceu no pensamento e tem como objeto o comportamento do elétron quando passa por uma fenda ou por duas fendas.

Quando não temos à disposição um laboratório e vamos executar esse experimento no papel, ou de outra maneira, nós temos um experimento do tipo antecipatório, criamos o

experimento mental. Então, simulando a possibilidade de um experimento, fazemos também experimento mental. Consideremos que desejamos conhecer como se comportam partículas (por exemplo, projéteis atirados por uma metralhadora) ao incidirem sobre uma parede contendo uma fenda vertical, cuja largura é algo maior do que a dimensão dos projéteis. No caso do experimento objeto desta discussão, podemos ir para um ambiente, fazer uma parede com uma fenda ou duas, pegar uma metralhadora e atirar nessa parede e ver o que acontece em outra parede (anteparo) que está do outro lado. Podemos observar e comparar efetivamente o resultado experimental com a previsão feita anteriormente. De modo similar, poderíamos conhecer e comprovar os fenômenos exibidos pela água num tanque de ondas, ao passar por uma ou duas fendas. Nesse sentido, os sistemas antecipatórios permitem antecipar o resultado que vai acontecer. Esse tipo de experimento é exaustivamente utilizado em ciências.

Nesta proposta, supostamente, nenhum novo conhecimento será abordado porque é bastante provável que sejam abordados conhecimentos que os estudantes já tinham ou deveriam ter construído. Mesmo assim, tais experimentos servirão para a consolidação do que se imagina como propriedades importantes quando se observam partículas, e aquilo que nós entendemos como propriedades importantes quando se observam ondas. Então, trata-se de uma possibilidade de que, se não se adquirirem novos conhecimentos, pelo menos, pode-se consolidar conhecimentos de maneira que torne mais significativa a comunicação sobre conhecimentos científicos.

A situação é completamente diferente quando procuramos lidar com elétrons que atravessam fendas. Há uma clara impossibilidade de se montar um experimento em laboratório, de maneira trivial. Nesse sentido, recorremos ao clássico experimento mental da dupla fenda com elétrons na atividade aplicada.

6.7.3 Sujeitos e ambiente da pesquisa

O estudo empírico foi realizado em três momentos distintos, totalizando doze horas para cada grupo de trabalho. Um total de dezenove estudantes do terceiro ano de bacharelado em Química formou os dois grupos distintos. Embora os grupos tenham sido compostos de forma aleatória, conhecê-los previamente foi de fundamental importância para o planejamento das ações a serem desenvolvidas. Dessa forma, realizamos um estudo exploratório por meio de observação direta em sala de aula de Química Quântica numa universidade pública estadual durante dois bimestres. Nosso intuito era identificar com mais clareza o perfil dos sujeitos que poderiam participar da atividade, bem como buscar as questões norteadoras que melhor pudessem possibilitar a recolocação de perguntas e a mobilização de dúvidas e inquietudes.

O desenvolvimento das atividades se deu em três etapas distintas para cada grupo, e cada etapa compreendeu seis momentos da sequência didática. Todos os momentos das diferentes etapas foram gravados em áudio e vídeo e transcritos literalmente. Dessas transcrições, foram tomados alguns fragmentos que ilustram, de um lado, o dilema que o aluno enfrenta ao comunicar fatos, fenômenos e teorias acerca do conhecimento científico e, de outro, o professor ao tentar intermediar o debate para que o saber escolar se torne operacionalizável, sem, contudo, ignorar o contexto epistemológico da produção científica.

De modo mais detalhado, a unidade didática foi conduzida de acordo com as seguintes etapas e atividades:

6.7.4 Organização sequencial das atividades[14]

Com o propósito de tornar mais inteligível o *corpus* da pesquisa, as atividades referentes ao experimento das fendas, foram descritas considerando seus aspectos gerais. Remetemo-nos às entidades partículas, ondas e elétrons, respectivamente, para a primeira, segunda e terceira etapas.

Resumidamente, as etapas são:

I. Primeira etapa: Sistema com partículas

Simulação do Experimento da Dupla Fenda com partículas

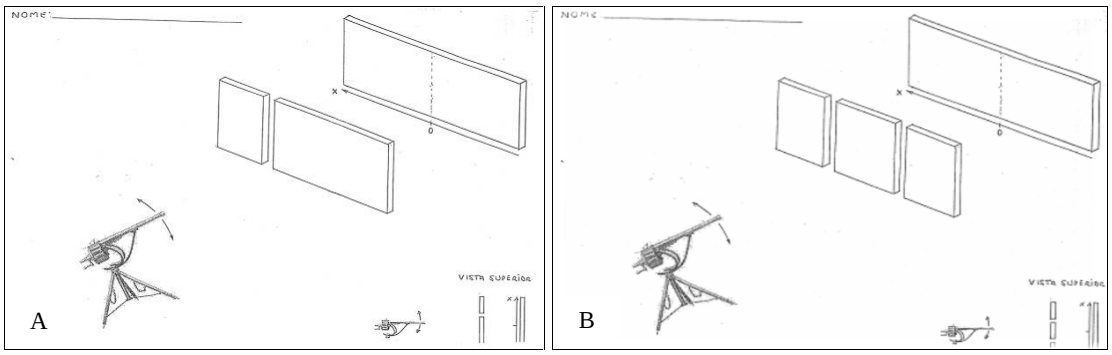


Figura 3 – Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)

[14] A sequência didática obedecia rigorosamente os mesmos seis momentos descritos, para cada etapa (I – Sistema com partículas; II Sistema com ondas; III – Sistema com elétrons). No primeiro e segundo momentos, o aluno lidava com fenda simples e fendas duplas separadamente.

II. Segunda etapa: Sistema com ondas

Simulação do Experimento da Dupla Fenda com ondas

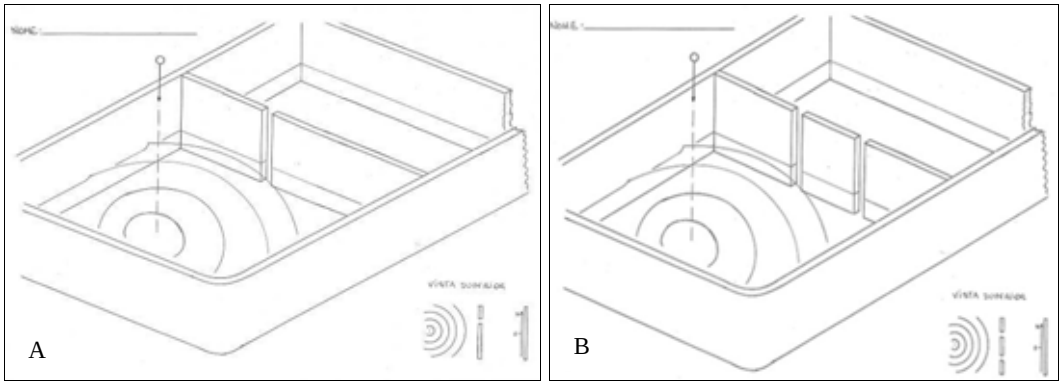


Figura 4 – Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)

III. Terceira etapa: Sistema com elétrons

Simulação do Experimento da Dupla fenda com elétrons

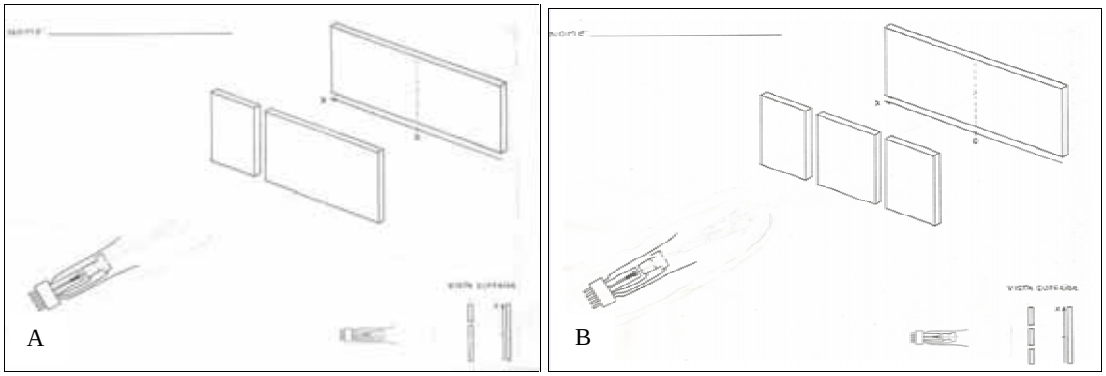


Figura 5 – Sistema com uma fenda (A) e sistema com duas fendas (B)

Em cada uma dessas etapas, seis momentos foram propostos independentemente, e na sequência que segue:

1) Leitura, interpretação do esquema e representação analógica (APÊNDICE A).
   Objetivo: Representar analogicamente os projéteis, as ondas e os elétrons considerando suas representações mentais para o fenômeno proposto.

Questão para o aluno: *Represente no anteparo (segunda parede) do esquema que você recebeu, as partículas, as ondas e os elétrons que atravessaram a parede com fendas e atingiram o tal anteparo, respectivamente, nas etapas I, II, III.*

2) Representação gráfica do fenômeno

Objetivo: Transpor as imagens produzidas nas atividades anteriores para a representação matemática do gráfico, neste caso, o gráfico de probabilidades.

Questão para o aluno: *Faça a representação gráfica do primeiro momento.*

3) Elaboração de texto sobre o fenômeno representado

Objetivo: Possibilitar a comunicação escrita dos conhecimentos científicos relativos às elaborações mentais utilizadas no processo de construção das imagens e gráficos nos momentos anteriores.

Questão para o aluno: *Elabore um texto explicativo dos momentos 1 e 2, de maneira que responda o que e o por que da sua representação.*

4) Discussão

Objetivo: Promover o debate, contribuindo para que o aluno possa se posicionar frente ao outro, possibilitar a circularidade de ideias, e outros modos de comunicação, de maneira a ampliar a carga informativa do discurso.

Mediação do professor: *Provocação do diálogo, exposição e confronto de ideias.*

5) Projeção do filme: Double Slit Theory Quantum Physics Animation

Objetivo: Possibilitar a visualização do fenômeno por meio de uma animação que caracteriza a dualidade onda-partícula.

Mediação do professor: *O professor ajuda o aluno a lidar com a informação visual acerca de questões teóricas e abstratas do experimento da dupla fenda.*

6) Leitura da versão em português, do texto correspondente às atividades, extraída e adaptada do livro The Feynman Lectures on Physics (APÊNDICE B).

Objetivo: Articular, de forma mais explícita, os conhecimentos reelaborados por Feynman, para que o aluno identifique suas dificuldades e formas de superá-las, sem que lhe sejam expostos os erros eventualmente cometidos.
Mediação do professor: *A leitura foi sugerida como possibilidade de comparação das ideias dos alunos com as proposições de Feynman.*

7) Questionário de avaliação das atividades (APÊNDICE C).
Objetivo: Buscar, nas respostas dos alunos, elementos que indiquem seus avanços e suas dificuldades e que, por sua vez, permitam inferir sobre o ensino da temática em questão. O questionário versando sobre os diferentes momentos das atividades foi apresentado aos participantes, individualmente, apenas no final da terceira etapa, com prazo de 20 dias para devolução.

Este instrumento de coleta de dados, constituído por uma série ordenada de perguntas, foi elaborado considerando a natureza da pesquisa, sua importância e, em particular, pelo fato de incluir diversas maneiras de obtenção de dados que materialmente seriam inacessíveis. Quanto à forma, as perguntas, em geral, podem ser classificadas em abertas, também chamadas livres ou não-limitadas, por permitirem ao informante responder livremente, usando linguagem própria, e emitir opiniões, como consideram Marconi e Lakatos (2007).

Por fim, compõem o *corpus* da pesquisa, o modo como o conteúdo é abordado e as formas de pensar e agir dos sujeitos. Nele, os procedimentos de pesquisa devem possibilitar a indagação e troca de significados, a interpelação problematizadora dos dados, denominado procedimento investigativo por Pérez Gómez (ano?). Assim, ao longo desta investigação, serão produzidas sucessivas definições de análise e focalização dos dados, em função da diversidade de interesses deste complexo campo de investigação educacional. Nessa perspectiva de pesquisa, os dados serão analisados sob várias abordagens e, embora a Análise do Discurso tenha sido o foco principal, a representação mental permeou com maior ou menor ênfase os diferentes momentos da análise, considerando as seguintes categorias:

I - *Inferências do professor*: Partindo do pressuposto que é o professor o responsável pela participação do aluno, fica evidente, como afirma De Longhi (2000), que esta participação está condicionada ao tipo de relação estabelecida por ele com o saber e o significado que dá ao conteúdo proposto.

II - *Níveis de comunicação do estudante*: a) Intraindividual e Intrapsicológico – permitem revisar seus conhecimentos e referentes; b) Interindividual – permite a circulação da mensagem.

III - *Tipos de Representação Mental*. Os estudantes trabalham com proposições isoladas, desvinculadas de modelos; utilizam modelos basicamente proposicionais ou basicamente imagísticos; fazem uso de modelos parcialmente proposicionais e / ou parcialmente imagísticos).

IV – *Diálogo.* a) contexto situacional; b) linguístico; c) mental.

Foi esperando que os pressupostos aqui apresentados pudessem, de fato, ser apreciados como instrumentos de análise dos registros feitos a partir do desenvolvimento da sequência didática, fornecendo um panorama fidedigno da comunicação dos estudantes sobre experimentos mentais, que passamos à análise do material de pesquisa.

7 INTERPRETANDO OS DADOS: UMA LEITURA QUALITATIVA

No âmbito da discussão do enfoque qualitativo, valemo-nos, nesta investigação, de instrumentos e técnicas que permitem, notadamente, a descrição e interpretação de fatos e fenômenos, a recuperação de sentidos, tendo como base a investigação interpretativa do conjunto de materiais empíricos que se transformaram em textos. Tais textos são produções dos sujeitos da pesquisa ou resultados de transcrições de suas falas. Dessa forma, foram interpretados à luz de elementos qualitativos e intersubjetivos.

As questões que nortearam o objeto de estudo – Como ensinar os conhecimentos abstratos de maneira que os alunos possam explicar e significar os fenômenos e transpô-los para situações do cotidiano? Como promover situações de ensino que alimentem o diálogo e o questionamento sobre os conhecimentos científicos? Como motivar os alunos a enfrentarem os acertos e os erros como crescimento acadêmico? Que competências seriam necessárias ao professor de química quântica para lidar com novas abordagens metodológicas em suas aulas? Qual seria a resposta dos alunos frente a novas abordagens alternativas? – serão retomadas ao longo da análise.

Cabe lembrar que tais questões foram importantes na definição e planejamento da sequência didática, sobretudo para focalizarmos respostas inusitadas, intervalos e deslizes de sentidos e buscarmos explicações plausíveis para a comunicação de conhecimentos científicos no contexto escolar. Feitas essas considerações, partamos para a mediação do professor no desenvolvimento da atividade "Experimento da Dupla Fenda".

7.1 Sistema com Partículas

7.1.1 O olhar do pesquisador e do professor: aspectos gerais do desenvolvimento

Comentários[15] gerais do desenvolvimento da atividade e da relação professor aluno têm o intuito de evidenciar os aspectos metodológicos adotados para a apresentação e condução da prática pedagógica.

[15] Os comentários apresentados foram compilados dos registros feitos pela pesquisadora e pelo professor que conduziu a atividade durante seu desenvolvimento.

Neste momento, não se trata de operacionalizar as sequências didáticas executadas na investigação, nem tampouco analisar isoladamente seus resultados. Nossa intenção é tão somente mostrar a importância de trabalhar o discurso em sala de aula. Nessa perspectiva, não há como estabelecer previamente o modo como as discussões devem avançar. Em grupos reais, como no nosso caso, os membros já se conhecem, então, a discussão pode iniciar-se com um estímulo que pode ser constituído de uma tese provocativa, um texto, um filme de curta duração, uma palestra ou um problema concreto, para o qual se busca uma solução. Nossa proposição se deu por meio de questões abrangentes, que contêm a trajetória cognitiva de cada estudante, ou seja, como interpretam, comparam e evidenciam seus avanços e suas dificuldades. Em sentido amplo, o momento de discussão possibilita expor os níveis de representação mental, visto que a atividade transita do macroscópico ao microscópico e simbólico.

Invariavelmente, para cada momento da sequência didática, o professor fez uma explanação sobre cada atividade, mas a estratégia fundamental adotada por ele foi a de perguntar o tempo todo e conduzir os alunos às conclusões desejadas. Vários autores discutem a importância da forma dialógica de mediação pedagógica nos processos interativos, entre eles, Garcez (1998). O autor também considera que o enunciador, para ser bem sucedido, deve apropriar-se de várias habilidades e estruturação do discurso, dentre as quais o distanciamento do próprio texto (modelos representacionais), para observá-lo e avaliá-lo junto ao leitor (neste caso o aluno). E foi justamente isso que o professor fez, provocou a reflexão, como podemos depreender dos momentos que seguem.

a) **Representação analógica: representação analógica e representação gráfica[16] do fenômeno para o experimento da fenda simples e da fenda dupla com partículas.**

À medida que os estudantes tentavam encontrar a solução para o problema proposto, o de representar no anteparo a disposição final das partículas que atravessaram a fenda (representação), algumas dúvidas com relação ao esquema surgiram, provavelmente por não ter ficado claro ou, ainda, porque as variáveis que poderiam ser consideradas para solução mais específica do problema não foram explicitadas. Cabe mencionar que o nível de interesse e a preocupação de participação na atividade, atendendo ao pedido do pesquisador e docente, foram grandes. Por esta razão, parte considerável do tempo foi consumida no esclarecimento

[16] As representações gráficas, discutidas em seus aspectos globais, não serão analisadas neste trabalho por merecerem um estudo particularizado de seus dados em outro momento específico.

de questões que talvez nem fossem importantes para o que se esperava da atividade, qual seja, representar e perceber eventos, inicialmente, da física clássica.

Em várias intervenções subsequentes, houve questionamento sobre coisas que nem mesmo Feynman abordou – *espessura da parede; parede resistente ou não aos projéteis, distância entre a metralhadora, parede e anteparo*. Tais questionamentos sugerem que o aluno busca os elementos constitutivos de possíveis modelos explicativos.

b) **O segundo momento, o da representação gráfica, pede uma linguagem de caráter mais científico (*sistema de referência, gráfico de probabilidade*).**

Os estudantes tiveram dificuldade em entender o tipo de representação gráfica que estava sendo pedido. Imaginavam inicialmente que deveriam representar a posição dos tiros no gráfico (analógica) e não uma curva de distribuição de probabilidade (matemático-abstrata). Eles deveriam ter noção cotidiana de probabilidade frequentista (por ex. chance de acertar na loteria), mas parece desconhecerem que existem outras formas de probabilidade e que elas podem ser representadas graficamente. Tudo isso apesar de terem tido contato formal em cursos de Cálculo, de Estatística, de Física e de Quântica.

c) **No terceiro momento, os alunos produziram, individualmente, um texto para o sistema de fenda simples e outro para o sistema de dupla fenda.**

A intenção nesse momento era a de incentivar o aluno a reconstruir as informações, conceitos e ideias vivenciadas nos momentos anteriores, por meio da linguagem escrita.

Em função do tempo gasto pelos alunos na produção de texto, considerado mínimo se levarmos em conta os aspectos que deveriam ser abordados para que a comunicação fosse inteligível, o professor fez vários apelos para que registrassem tudo sobre o que foi feito e porque fizeram de tal maneira. Sem interferir no processo, o professor dizia: não economizem palavras e espaço, há tempo suficiente para que vocês escrevam tudo sobre o experimento em questão.

Neste momento, cabe uma reflexão sobre o papel da escola na condução de atividades que efetivamente envolvam a comunicação verbal e escrita. Mesmo diante da oportunidade de rever sua produção, o aluno se mostrava acrítico, no sentido de tornar mais acessível sua produção. Nota-se que esses estudantes dificilmente são colocados em processo de desenvolvimento da prática discursiva escrita e formal. Falta-lhes, provavelmente, o diálogo do professor/aluno sobre a escrita. Essa questão será retomada com mais especificidade, mas é fundamental lembrar que as representações se manifestam no discurso e estão associadas às concepções e vivências dos estudantes.

d) **Momento de discussão que se caracterizou como comunicação dialógica. As inferências do professor, neste momento, foram no sentido de incentivar o debate e discutir as propriedades de partículas.**

Um dos momentos chave do processo consiste em promover o diálogo, discutir os conhecimentos físicos que emergem mais facilmente e buscar aqueles que melhor correspondem ao fenômeno. É também um dos momentos mais difíceis, visto que o processo discursivo na escola se constitui sob a influência de certas condições de produção. Particularmente no ensino superior, é uma prática pouco utilizada. Por conta disso, manter e alimentar a discussão foram tarefas árduas para o professor.

e) **Neste momento, privilegiamos imagens em movimento, por meio da projeção do filme: Double Slit Theory Quantum Physics Animation, e os alunos responderam muito bem a esse recurso.**

Esta animação consistiu em dar um *feedback* sobre as atividades desenvolvidas, além de possibilitar questionamentos resultantes de comparações entre o que o aluno produziu e o proposto pela animação. O personagem condutor do experimento é representado por um senhor idoso, de barba grisalha, que usa uniforme de super-herói, estereotipando um "intelectual da quântica". O experimento da dupla fenda, (objeto empírico) está representado no filme, e abriu um espaço significativo de debate, mostrando-se um recurso potencialmente didático.

O professor explorou muito bem esse recurso, questionando os alunos sobre o que estavam vendo e até que ponto as imagens respondiam às duvidas geradas nas etapas anteriores. Trata-se de imagens em movimentos rápidos e o fenômeno é sintetizado em questão de um minuto para cada sistema, o que permitiu trabalhar isoladamente as entidades físicas, objetos dessa investigação. Sendo assim, à medida que os alunos traziam dúvidas, o professor acionava as imagens, provocando nova reflexão.

f) **Leitura do texto de Feynman e colaboradores (APÊNDICE B)**.

Foi o momento em que o estudante teve contato com as explicações e representações de Feynman, portanto, a primeira aproximação com o texto científico. Nesse momento, foi possível remeter os alunos ao texto do Feynman, que, com seu estilo questionador, dinâmico e pouco convencional, possibilitou a leitura. Eles puderam comparar suas respostas com as do autor, encontrar as pistas que conduziam aos conhecimentos científicos, rever os erros e as condições em que foram produzidos, apenas pela intermediação do professor.

É importante lembrar que esta etapa foi planejada levando em conta que a questão da linguagem escrita deve ser clara, interessante e acessível. Foi escolhido o texto de Feynman que, além de reunir estas características, é um texto instigante, onde o autor apresenta questionamentos que, na prática, são também dos alunos.

Metodologicamente, os diferentes momentos exigiram escolhas que validam plenamente nossas atividades para esta investigação. Extrapolando para um contexto de sala de aula, o professor, ao planejar seu curso, precisa fazer escolhas sobre que aspectos teóricos abordar, mas, sobretudo, ele deve se perguntar como processar o ensino, para que a aprendizagem apresente resultados mais satisfatórios.

7.2 Fragmentos de Fala

Para Flick (2004, p. 209), "as análises de conversas restringem seu foco ao fenômeno sociolingüístico particular que está sendo estudado, dedicando sua atenção à coleta e análise de situações desse fenômeno em contraste com as tentativas de análise de casos completos".

Na operacionalização da análise, explica Orlandi (1996a), a Análise do Discurso trabalha com a noção de recortes, sendo estes realizados no processo de interlocução, tendo em vista as condições em que são produzidos. Portanto, o recorte é um fragmento da situação discursiva e, como tal, neste caso, optamos por reunir os fragmentos que ilustram a mediação do professor com o intuito de fomentar o diálogo e explorar os sentidos. Em síntese, daremos ênfase ao processo de constituição de sentidos e os aspectos formais são apenas um dos componentes do texto. As categorias: Níveis de Comunicação e Tipos de Representação Mental compõem o foco principal dessa análise, considerados abrangentes o suficiente para responder nossa questão de pesquisa. No entanto, entendemos que, quanto maior a diversidade de interações, mais os estudantes constroem sentidos e categorias referenciais de interpretação da realidade. Essas interações têm uma evidente dimensão educativa, especificamente para os estudantes sujeitos dessa investigação, pouco acostumados com o debate em sala de aula, como já aludimos neste trabalho. Nessa perspectiva, a intervenção pedagógica deve propiciar um ambiente rico em possibilidades e capacidades de provocar desequilíbrios cognitivos, desestruturar a lógica do silenciamento e novas formulações por parte dos estudantes.

7.2.1 O professor

O docente apresentou o arranjo experimental, que consistia basicamente em metralhadora, parede com fenda simples e anteparo. Como o esquema apresentado possuía, intencionalmente, poucos elementos, o professor introduz, por meio da linguagem coloquial, gradativamente, algumas formalidades, tais como: sistema de coordenadas e orientação específica.

As inferências do professor são reguladoras da construção conceitual que se dá no processo de ensino aprendizagem. Embora, neste início da atividade, os conteúdos envolvidos possivelmente fossem até certo ponto corriqueiros, na maioria das vezes foram trabalhados longe do contexto experimental tanto físico como mental. Nesse sentido, as intervenções do professor tendem a recontextualizar os conhecimentos fundamentais, em busca dos referentes que os alunos já possuem, permitindo avançar para níveis mais complexos de elaboração.

- Ao apresentar a proposta de atividade, o professor se utiliza da linguagem coloquial para envolver os estudantes num clima de confiança. Os conteúdos vão sendo introduzidos, igualmente, por meio de linguagem coloquial e, aos poucos, alguma formalidade, procurando mostrar os primeiros sinais do tipo de relação que pretende ter com os saberes ao significar os conhecimentos em discussão. No Quadro 1, destacamos um fragmento do momento inicial da atividade.

Professor: Mais uma vez, eu quero agradecer vocês pela acolhida a esta nossa proposta de trabalho e falar que nossa atividade de hoje começa com uma coisa bem simples [...] o que a gente vai procurar ao longo desses três períodos é discutir uma questão importante em mecânica quântica... Bom, quando a gente fala em probabilidade, estamos evidenciando a impossibilidade de uma determinação. Nós podemos determinar apenas probabilidade de uma determinação, mas não uma determinação absoluta, seja de momento, seja de posição. Então, a Mecânica Quântica impõe um impedimento nesse sentido, dessa determinação, e o que nós vamos trabalhar aqui é justamente esse impedimento. Essa impossibilidade de uma descrição, digamos assim, mais analógica do sistema. Ok? Então, nós vamos começar com uma atividade bastante simples, surpreendentemente simples para vocês... Então. eu vou distribuir para vocês (distribui uma folha com a representação do dispositivo experimental da dupla fenda)... Esse problema é um problema bastante conhecido na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica... O problema que vamos tratar, aqui, chama-se o problema da Dupla Fenda. Só que para a gente chegar propriamente no problema da fenda... Então, no que se constitui esse arranjo experimental que vocês têm...? Do lado esquerdo desse arranjo, vocês têm uma metralhadora. Essa metralhadora, ela tem certa flexibilidade de movimento prá direita e prá esquerda, para cima e para baixo. Então, ela tem liberdade de movimentação. À frente desta metralhadora, vocês têm uma espécie de uma parede, e essa parede tem uma fenda. Ok? Olha tem uma fenda, uma fenda pela qual os projéteis podem passar. A parede é intransponível. Ela retém projéteis que não foram..., mas ela tem uma fenda aqui pela qual os projéteis podem passar. No fundo, nós temos outra parede, por exemplo, uma parede de madeira, na qual os projéteis podem se cravar. Então, aqui à direita vocês têm uma representação da vista superior... Percebam que lá tem uma parede (o eixo x) que está orientada sobre uma determinada... [...]. O centro do arranjo está alinhado com o centro do cano da metralhadora. Não sei se vocês estão percebendo isto? E a fenda não precisa... Ela poderia até estar no centro do arranjo também, mas ela não precisa estar necessariamente no centro. Tanto é que vocês... Percebam que ela está levemente deslocada, ok? Bem, o que é que nós queremos que vocês façam? *Que vocês representem nesta parede aqui, (que é uma parede... vocês podem considerar que é uma parede de madeira), a distribuição dos projéteis que forem atirados pela metralhadora.*

Quadro 1 – Exemplo 1: partículas.

Note-se que, no longo fragmento do quadro 1, fica claro que o professor, aos poucos, procura trazer os estudantes para o contexto da temática, objeto da investigação, bem como do que se quer sobre o tema. Além da descrição do esquema, em vários momentos da fala, o professor se expressa tentando uma conexão mais afetiva com o conteúdo procedimental, como: *[...] Percebam que lá tem uma parede (o eixo x). [...]. Percebam que ela está levemente deslocada, ok? [...] o que é que nós queremos que vocês façam [...].* Esse tipo de intervenção permeia toda a atividade.

O discurso do professor, a que nos remetemos no texto, inicia-se com a preocupação de não deixar muitas dúvidas quanto à execução da tarefa. Considerando que a problemática inicial é apresentada por meio de um esquema, pouco comum nas situações de sala de aula, o sucesso da atividade vai depender da forma como o professor problematiza.

- Aos poucos, o professor vai introduzindo alguma formalidade na linguagem, buscando avançar em termos do nível de conceitualização que se deseja alcançar e a partir do qual se desenvolverá a atividade.

Professor: No cantinho de baixo à direita, vocês têm aquilo que representei como uma vista superior ali. Então, visto este mesmo arranjo experimental de cima, tem esta vista superior. Percebam que, no anteparo de madeira, por exemplo, final, que vai absorver esses tiros, tem um sistema de coordenadas (de eixo aí) onde está mostrado o centro do arranjo experimental (zero) e x que está numa orientação específica prá esquerda... Não tem problema, poderia ser pra direita..., mas, em particular nesse caso hoje, preferimos representar à esquerda. [...] Professor: Lá no fundo, alí, olha. Lá tem o eixo x, ok? Eu quero que vocês representem qual vai ser a distribuição de projéteis, nessa parede aqui..., a do fundo, aquela que tem o eixo x. Professor: O eixo de fixação dela, não você só move o cano... para direita e para a esquerda e para cima e para baixo, então, ela tem uma ângulo... de abertura, que é grande... é bastante grande, tá..., de tal modo que ela possa cobrir as duas paredes de tiros se for o caso. Professor: Fiquem livres... O que você acha? Fiquem livres para representar, todas as possibilidades que vocês quiserem. A metralhadora, o cano da metralhadora tem esse..., movimento horizontal e tem movimento vertical também. Ela pode atirar projéteis tanto com algum movimento horizontal quanto com algum movimento vertical também. Ok?

Quadro 2 – Exemplo 2: partículas.

Uma forma diferenciada de conduzir a atividade demanda não propriamente uma mudança radical de seus métodos, mas uma nova forma de compreender seu significado. Ao invés de apresentar o conceito, definição ou expor verbalmente o fenômeno, o professor apresenta o problema, mas isso nem sempre é suficiente. No Quadro 2, fica claro que o professor deseja que os alunos construam domínios de referências que orientem suas interpretações da realidade.

No Quadro 2, temos três fragmentos que fazem parte de diferentes sequências, mas todas ilustram a preocupação do professor em situar o aluno no contexto a ser explorado. Note-se que as intervenções dele são feitas no sentido de não responder, e sim de fazer com que os alunos articulem fragmentos de conhecimentos, atentem para as pistas, os pormenores, indícios, silêncios e outros gestos.

Como no encaminhamento dado por Feynman no estudo do comportamento quântico, as partículas (projéteis de uma metralhadora), por serem mais familiares e explicáveis na forma clássica, introduzem a atividade, que visa apenas confrontar o comportamento quântico do elétron atividade com partículas, por serem mais familiares e explicáveis por forma clássica

A tarefa da Análise do Discurso seria explicar como os sentidos são constituídos na instância do discurso. Nessa perspectiva, acrescenta Pêcheux (1997), conhecer os mecanismos mediante os quais se põe em jogo um determinado processo de significação, é propor o deslocamento da noção de função para a de funcionamento. Orlandi (1999) também se refere a essa tarefa ao afirmar que se trata, na verdade, de um percurso analítico que vai da superfície linguística (a fala não elaborada) para o objeto discursivo. É justamente essa a tentativa do professor. Quando apresenta cada atividade, ele procura possibilitar diferentes relações para o falante estabelecer com a linguagem e com seu funcionamento.

É importante destacar que o que se deseja é resgatar algumas propriedades de partículas, contudo, dissolve-se a linha divisória entre saber e não-saber, até mesmo resultados díspares devem ser entendidos como conhecimentos construídos em processos singulares de aprendizagem e compete ao professor promover a transformação desses saberes.

De maneira geral, considerando a perspectiva ampla de incorporar os componentes éticos e afetivos, torna-se indiscutível o papel do professor como mediador do processo e da forma como os estudantes deram sentidos a essa etapa da atividade. Nessa perspectiva, as representações dos estudantes trazem as marcas dos modelos construídos a partir de suas percepções e também do discurso do professor.

7.2.2 As representações mentais

A representação matemática pede uma linguagem de caráter mais científico, que, paulatinamente, surge da fala do professor como, por exemplo: sistema de referência e gráfico

de probabilidade. Nessa passagem, fica evidente o nível de conceituação que se pretende alcançar. No entanto, mais que os conceitos, queremos identificar os modelos que os alunos apresentam, neste caso o de partículas no experimento da dupla fenda.

Professor: Bom, isso que a gente fez, a atividade que vocês fizeram, ela... foi feita em cima de uma representação gráfica de uma parede..., com uma metralhadora..., enfim, coisa desse gênero... Tem uma parede e, lá no fundo... tinha lá uma coisa que absorve os projéteis da metralhadora... e os projéteis ficam encaixados aí... Vocês representaram os projéteis, né? Isso que vocês fizeram é uma representação que a gente chama de representação analógica da natureza. Por que faz certa analogia, há uma similaridade representacional com o evento físico alí... né? Eu não trouxe uma metralhadora para vocês atirarem, por sorte...(risos), em parede nenhuma, nós fizemos o desenho e, vocês fizeram a representação física do que acontece. Então, vocês fizeram uma atividade analógica. Agora, a gente convida vocês para fazerem uma atividade diferente, que é a representação matemática disso que vocês fizeram. Então é uma representação matemática. Para tanto, nós vamos distribuir... Risos... [...] [...] Então, nós pedimos um gráfico que mostre a probabilidade desses projéteis se distribuírem naquela parede do fundo. Não é prá desenhar o projétil, agora, no papel de gráfico. É um gráfico de probabilidades de distribuição dos projéteis na parede.

Quadro 3 – Exemplo 3: partículas

O professor seleciona algumas representações, dentre as quais, as que se mostravam compatíveis com a discussão de Feynman e outras incompatíveis sob esse ponto de vista.

DFA – O zero está bem na frente? Professor: O zero, ele está alinhado, esta é uma boa pergunta [...], o zero está alinhado com o cano da metralhadora, tá?... E ele passa... E a fenda não está na frente... Percebam na vista superior turmaaaa, dá uma olhadinha na vista superior, oh, que vocês vão ver o eixo direitinho, estão vendo?... Então, o zerinho, ele está alinhado com o cano da metralhadora, mas não está alinhado com a fenda. Perceberam? Bem, algum de vocês gostaria de explicar para o resto do público as representações que fizeram, quem se habilita? Elas estão aqui, a primeira e a segunda está na mão de vocês, ninguém se habilita para explicar? Eu vou fazer o seguinte... vou mostrar três representações para vocês, temos esta representação aqui..., nós temos esta e esta representação, o mesmo fenômeno representado aqui de três maneiras que vocês vêem, que semelhança e diferenças tem essas representações? Se alguém quiser justificar a sua representação, porque ela foi citada aqui, fica à vontade. **DFG**: Esta tem a área menor, né? **Professor**: Esta aqui? Será que o dono dessa representação não gostaria de explicar ela? **Professor**: Fala para nós aí DFC **DFC:** ... essa região com maior probabilidade de achar e a coincidência com a fenda da parede anterior, onde os projéteis podem passar e atingir a parede posterior, nos outros lugares que não tem fenda não tem como a bala atingir a parede posterior... **Aluno**: Neste gráfico, para mim, mais embaixo da barreira, tem maior abrangência em x, já em cima da barreira tem a menor abrangência em x. **DFG**: Não, mais aí... pelo o que dá aqui não é a altura da barreira ...vai se aproximando da barreira em x e vai aumentando a probabilidade de acertar.

Quadro 4 – Exemplo 4: partículas

Os modelos mentais servem para caracterizar a forma como as pessoas pensam sobre um sistema físico qualquer. São modelos que existem na mente de alguém e servem para explicar o comportamento de um sistema, dialogar com o fenômeno e lhe atribuir causas. Nessa situação, embora lidando com esquema previamente elaborado pelo professor, no modelo final de parede que serve de detector das entidades físicas (partículas, ondas e elétrons), há um núcleo central de conhecimentos físicos que os alunos devem resgatar ao longo do processo.

O uso de modelos mentais foi muito recorrente na história das descobertas científicas. Teweney (1992 apud BORGES, 1997) conseguiu encontrar, nas anotações de Faraday, várias ideias e imagens sobre o conceito de campo, que reapareciam de tempo em tempo durante os anos em que tentava tornar mais claras suas ideias de linhas de forças.

DFG: A largura e a espessura também...
DFJ: Já não é tão considerada já que o professor falou que não atravessa de jeito nenhum, o projétil.
Professor: Não atravessa a parede.
DFJ: Na primeira parede?
DFG: Mais... e você tem uma fenda assim..., na parede muito grossa... ela não vai passar para o outro lado...ela tem um espaço ali de intervalo que ela passa...
[...]
DFJ: Talvez eu discorde... eu discordo disso, porque a mobilidade de se movimentar é igual de cima para baixo.
DFG: Então, é o que eu disse..., se fosse o tamanho da barreira...
DFG : Depende do tamanho... vai chegando perto da distância x, por exemplo, quanto mais perto o tiro passa perto da barreira... se ele passa no meio da fenda...
DFJ: Mas que altura... mais o menos...?
DFG: Quer dizer que, no cantinho da barreira, mais próximo da fenda seria melhor a probabilidade?

Quadro 5 – Exemplo 5: partículas

As categorias que respondem a cinco questões definidas por Rouse e Morris (1986), e já identificadas neste trabalho: Como é o sistema? De que o sistema é feito? Como ele funciona? O que ele está fazendo? Para que ele serve? Em sentido amplo, os modelos mentais respondem a essas questões e mais elaboradas são as respostas se os sujeitos dispõem de algum conhecimento formal do fenômeno em estudo.

A discussão destacada no Quadro 5 mostra que os estudantes, embora tenham realizado a tarefa de representar seus modelos mentais do comportamento de partículas, demonstrando certa facilidade, o uso da língua nessa situação autêntica se mostrou entrecortado, com lacunas importantes, que acabaram dificultando o diálogo. Torna-se inconteste a inferência do professor no sentido de estruturar a comunicação, perceber o que é ou não compatível em termos de conhecimentos que tentam explicar, confrontar as

informações que emergem da discussão, tomar decisões não no sentido de haver consenso, mas na tentativa de ampliar os saberes escolares desses estudantes.

As Figuras 6 e 7, selecionadas dos modelos mentais como respostas às atividades propostas, evidenciam que os alunos buscam os conhecimentos que já possuem de situações cotidianas ou formais de ensino. É interessante notar que as representações diferem e, nesse aspecto, apesar de, no diálogo do Quadro 5, estar clara a noção de trajetória da partícula, os modelos mentais correspondentes diferem significativamente em função das variáveis que poderiam interferir em tal trajetória. Assim, na Figura 6A, sobre sistema com uma fenda, a aluna considerou o ricocheteamento das partículas que se cravaram em duas regiões do anteparo, à esquerda de x=0. Embora o raciocínio seja similar, o aluno DFA, Figura 7A constrói um modelo, mas agora as partículas se posicionam à esquerda e à direita de x=0.

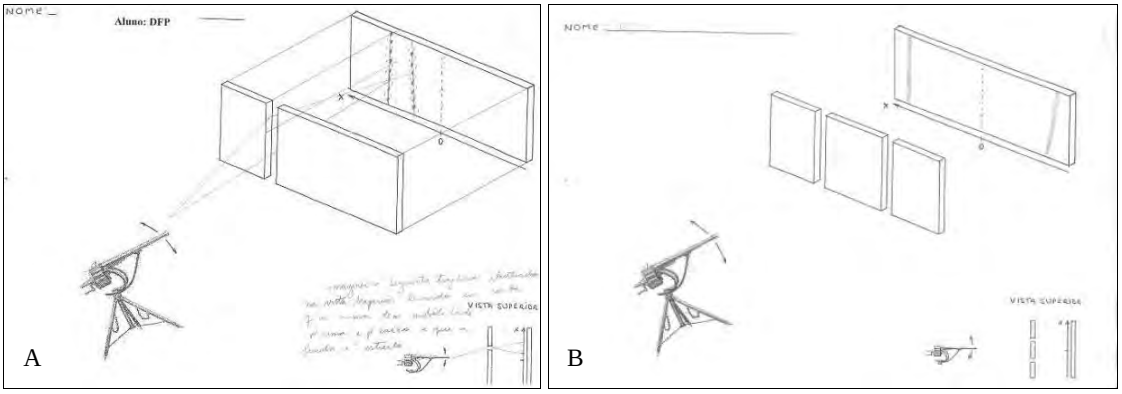


Figura 6 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

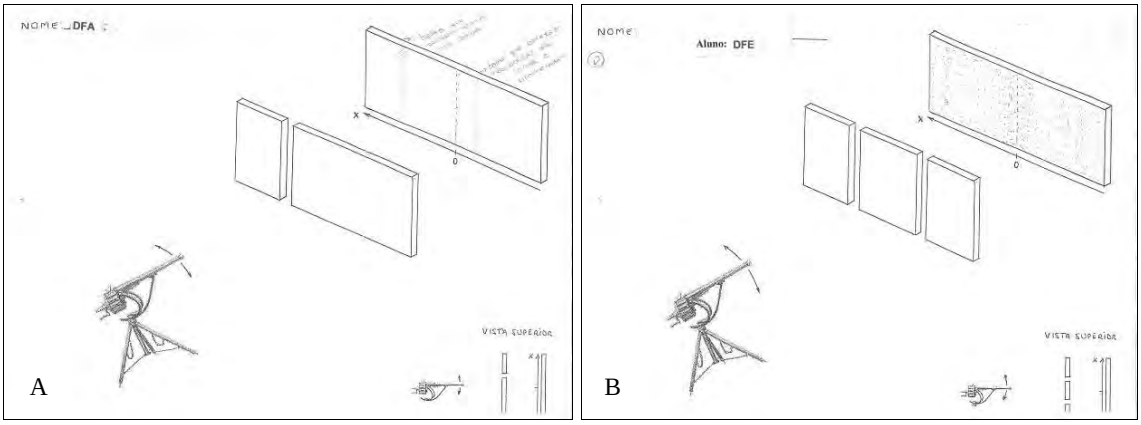


Figura 7 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

Para o sistema com duas fendas, Figuras 6 (B) e 7 (B), temos dois modelos mentais diferentes, o primeiro exibe a concentração de partículas nas extremidades do anteparo e o segundo mostra uma dispersão que cobre todo o anteparo, no entanto, há uma concentração maior em x=0. Como propõe Feynman, as probabilidades simplesmente se somam, portanto, o efeito de ambas as fendas abertas é a soma dos efeitos com cada fenda aberta separadamente.

Para os propósitos de Feynman a metralhadora dispara sempre com a mesma taxa de repetição durante as medidas, a probabilidade é simplesmente proporcional ao número de projéteis que alcança o detector em um intervalo de tempo padrão. Dessa forma, o que se mede é a probabilidade de chegada de um projétil em função da posição x.

Além dos exemplos das Figuras 7 e 8, selecionamos um conjunto de modelos mentais elaborados pelos estudantes: DFA, DJA, DFC, DFE, DFF, DFJ, DFL, DMM, DFP e se encontram no APÊNDICE A. O critério de escolha recaiu sobre a diversidade de modelos, portanto, são várias formas de representação para um mesmo sistema com uma ou com duas fendas. Os únicos modelos que apresentam a mesma estrutura para o sistema com partículas com uma ou duas fendas são dos alunos: DJA, DFC, DMM,

Resumidamente, os modelos dos estudantes, em geral, são diferentes, como pode ser visto no APÊNDICE A. Para uma fenda, encontramos concentração de partículas ora somente à esquerda de x, ora à direita e esquerda, e ainda aqueles modelos que se aproximam da proposição de Feynman. Para sistemas com duas fendas, os modelos seguem o mesmo raciocínio. Note-se que, em termos de modelo mental, apenas um aluno desse conjunto selecionado admite, ou pelo menos representa, maior probabilidade em x=0, ou seja, no centro do anteparo.

A pluralidade e a heterogeneidade geradas com base nos modelos produzidos nessa atividade são importantes, porque ajudam a pensar com base em pontos de vista diversos, de interpretar a perspectiva do outro.

Mediante a construção e manipulação de modelos mentais, o que os alunos fizeram, no experimento da dupla fenda, é nada mais que a simulação de modelo a partir do qual se produzem as abstrações responsáveis por encontrar as expressões formais das leis e teorias.

Nerssessian (2007) concorda que os modelos sejam mediadores entre os fenômenos e a expressão da linguagem (incluindo a matemática). Nessa perspectiva, os modelos criados pelos alunos, com base numa situação imaginária, enquadram-se exatamente no pressuposto de Nerssessiann (2007), entre o modelo experimental com uma e com duas fendas, estamos lidando com probabilidade. Uma probabilidade que, segundo Feynman e já referida anteriormente, é simplesmente proporcional ao número de projéteis que alcança o detector em um intervalo de tempo padrão. Ainda na perspectiva de Nerssessian (2007), os experimentos mentais implicam

imaginar uma sequência de eventos e o contexto narrativo serve para guiar o processo e comunicar a outras pessoas.

Os alunos, de um modo geral, responderam muito bem a esse momento da atividade, que, em certa medida, mostrou-se rica em possibilidades, mas de fácil solução, provavelmente, porque estavam lidando com as propriedades das partículas. Tais propriedades foram abordadas nas falas dos estudantes e com a ajuda do professor. Como já referido, torna-se inconteste a inferência do professor no diálogo com o aluno e o conhecimento.

Um olhar sobre os diferentes modelos sobre partícula permite-nos identificar, praticamente, um modelo para cada aluno (Ver outras representações destes alunos no APÊNDICE A).

7.2.3 Momento da discussão

O aluno manifesta dúvidas com relação ao esquema, que pode não ter ficado claro. Ao contrário de uma aparente dispersão, a interação do professor/alunos contribui com a interpretação do enunciado. Podemos identificar, neste fragmento, as formações imaginárias, trazendo ao discurso condições que deverão ser satisfeitas para tornar os atos da fala explicáveis. Assim, além da inferência do professor, podemos, agora, identificar os diferentes níveis de comunicação dos estudantes. Inicialmente, destacam-se os níveis *intraindividual* e o *intrapsicológico*.

[...] DFP: Você diria valores de x que comportasse como onda talvez e como partícula ela vai ter uma... DFC: Você tem que ver o seguinte: a probabilidade de você ter uma partícula, né, então, você tem uma partícula... DMM: Aonde deixa de se encontrar naquela região é uma região que passa a fenda..., passou por alí, se encontra alí e, agora, ela está mais para lá, mais para cá... [...] DFG: Se você faz uma pesquisa... Professor: Só tem uma pessoa que não falou ainda. DJA: Eu concordo com o DMM, eu acredito que a parede vai ser... numa posição, embora esteja próxima a fenda..., pela largura da fenda ela não chega tampar..., se ela passar, ela vai atingir a parede... Professor: Mais alguém quer falar? Eu vou adicionar um problema para vocês aqui que o DFG trouxe. DFG, você falou bastante das propriedades da fenda, que propriedades que você falou da fenda? DFG: Falei da espessura da fenda... certo, não da altura...Vai atingir pela espessura e a espessura da primeira barreira, ou seja, a largura da fenda e a espessura dela.. Professor: De que maneira esta espessura da parede que contém a fenda pode interferir no resultado?

Quadro 6 – Exemplo 6: partículas

Na passagem acima podemos inferir que os alunos imaginavam, inicialmente, que deveriam representar a posição dos tiros no gráfico (representação analógica) e não uma curva de distribuição de probabilidade (matemático-abstrata). Eles devem ter noção cotidiana de probabilidade frequentista (por exemplo, chance de acertar na loteria), mas parece que desconhecem que existem outras formas de probabilidade e que elas podem ser representadas graficamente. Tudo isso apesar de terem tido contato formal em cursos de Cálculo e de Quântica.

Entre as diferentes formas de inferência utilizadas e visando obter sucesso, o professor se apropriou de várias habilidades de estruturação do discurso, propiciando e facilitando a reflexão sobre a atividade. As intervenções do professor, neste primeiro agrupamento, evidenciam uma busca bastante direcionada para a construção conceitual que se dá em sala de aula, ou sobre conceitos já elaborados em outros momentos da formação acadêmica.

O discurso, conforme Orlandi (1988), não surge ao acaso, nem se fecha num objeto acabado, embora aparente ser uma unidade, remete-se sempre a outros discursos em busca de realidade significativa. Neste momento da atividade, de acordo com Pêcheux (1997), a troca discursiva é presidida por um jogo de imagens, e diz respeito às diferentes posições do sujeito do discurso.

No Quadro 6, podemos notar que o discurso não é linear, nem evidente, nem homogêneo. Inicia-se com a fala dos alunos, num processo dialógico permeado de lacunas e de interrupções, mas o professor deixa que o debate flua, enquanto considera que o equívoco e a falha, a fluidez e a incompletude são constitutivos do discurso e não fenômenos acidentais desses aspectos (ORLANDI, 1988; PÊCHEUX. 1997).

No final do fragmento, o professor interfere por meio de um questionamento acerca das variáveis que estão em discussão, neste caso, a espessura da fenda. Conciliar a comunicação dialógica e os conhecimentos formais ainda é tarefa árdua no ensino superior.

7.3 Sistema com Ondas

7.3.1 O olhar do pesquisador e do professor: aspectos gerais do desenvolvimento

Os comentários aqui apresentados têm a intenção de evidenciar os aspectos metodológicos adotados para a apresentação e condução de uma sequência didática, em particular, de problema clássico sobre o comportamento das ondas

Novamente, o professor inicia a atividade descrevendo o arranjo experimental, mas agora usando linguagem menos coloquial, *superfície detectora de ondas, gerador, circuito, propagação*. Surgiram dúvidas que, como na atividade anterior, explicitam o desejo de conhecer bem o sistema, fazer boas representações e, assim, corresponder às expectativas do professor e pesquisadora. O professor pede, como anteriormente, uma representação de probabilidade, mas não se fala ainda em intensidade.

Surge uma dúvida quanto às características do líquido (se *é um líquido normal?*). A dúvida persiste, visto que os alunos entendem que devem existir propriedades no líquido (viscosidade, densidade) que podem determinar seu comportamento e, por extensão, sua representação.

Quando da apresentação do experimento, o professor falou de um *líquido*. Houve um debate bastante rico sobre quais as propriedades do tal líquido (provavelmente, porque os alunos se preocuparam com viscosidade e densidade). Apegados a essa questão, é possível que ela tenha contribuído para dificultar as representações na atividade sobre as ondas, o que não teria acontecido caso o professor tivesse, de início, admitido ser simplesmente a água. Tratou-se de um excesso, um preciosismo no encaminhamento em se lidar com um sistema o mais genérico possível e, com isso, deve ter comprometido excessivamente a atenção dos alunos em cima de um detalhe que não faria diferença no resultado final. Eis uma das falhas na execução da transposição didática.

Nas suas explicações, os alunos intercalaram expressões técnicas (*propagar, interferência, construtiva*) com cotidianas (*pegar, bater, normal*) e, aos poucos, foram se apropriando da linguagem científica: *onda mecânica, viscosidade do líquido, amplitude da onda, energia*. Embora o repertório de termos científicos fosse aumentando, os alunos também faziam uso da linguagem coloquial, mas a fala era ainda bastante entrecortada. O animismo, embora pontual, pôde ser identificado em alguns momentos, como o termo "tivesse nascido" para exprimir a percepção de que a fenda atua como um gerador de ondas. Isso se enfatiza pelo "vai sair um círculo".

Os alunos supõem, por alguma razão, que a propagação tenha natureza parabólica e o professor fez uso da lousa para representação do gráfico de ondas. Neste ponto, havia equações e o mesmo recorria à linguagem científica. O professor aproveita a presença de um termo de interferência numa equação (representação matemática) para convidar os alunos a explicarem sua origem física (analógica), a fim de que eles exercitem a transposição mundo físico → representação (matemática).

- Características das ondas

A trajetória das ondas é indefinida, a função que a descreve não é unívoca, em particular, quando ocorre o fenômeno que abordamos, a difração, que é o efeito exibido pela onda ao atravessar uma fenda de largura da ordem de seu comprimento de onda. Na difração, a fenda atua como uma fonte de ondas esféricas, cuja trajetória não é definida por uma linha simples, mas por uma superfície de propagação. Desse modo, ondas exibem difração e, na presença de outras ondas, podem exibir interferência. Ondas também transportam energia, no entanto, não transportam massa. Para as ondas é possível falar em *intensidade,* que pode mudar continuamente, e não de modo quantizado em unidades como no caso das partículas.

O Quadro 7 compila essas diferenças discutidas com os alunos.

Partículas	Ondas
Corpuscularidade	Intensidade
Trajetória definida	Trajetória "indefinida"
Probabilidade $P_{12} = P_1 + P_2$	Intensidade $I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta$
Sem difração e interferência	Difração e interferência
Transporta massa e energia	Transporta energia

Quadro 7 – Características de partículas e ondas

7.3.2 Fragmentos das falas

Os fragmentos que seguem ilustram as representações e os modos de interações do professor e alunos durante a primeira etapa da atividade com ondas.

A singularidade desta atividade possibilita entrever, no interior dela, a correlação de conhecimentos físicos clássicos que o aluno deve explorar. Nesse sentido, novamente, o professor inicia a atividade descrevendo o arranjo experimental, algo bastante similar ao experimento com partículas, mas, na essência, trata-se de um tanque de ondas. Considerando que, na atividade anterior, o aluno percorreu alguns passos para solucionar o problema, e que esses mesmos caminhos foram propostos para a atividade com ondas, as elaborações das respostas foram favorecidas em função da identificação de obstáculos postos.

Nesse segundo momento, o olhar atento do professor deverá ser no sentido de dar continuidade ao processo interlocutivo.

7.3.2.1 O professor

É importante salientar que o professor adota os mesmos princípios da comunicação utilizados no primeiro momento, a atividade com partículas, apropriando-se de várias habilidades de estruturação do discurso, entre as quais, a de aproximar afetiva e intelectualmente o aluno, com o intuito de garantir a forma dialógica de intervenção didática.

O fato de exigir do estudante, além de uma interpretação do enunciado, a articulação a outros enunciados, que, apesar de ter o mesmo objetivo da atividade com partículas, configura-se uma tarefa cujo grau de complexidade é maior, por envolver conhecimentos físicos mais elaborados. Um dos fatores que, provavelmente, contribuem para esse fato é o uso de linguagem e dispositivos mais "científicos": circuito, gerador, superfície detectora, propagação, como se pode ver no fragmento que segue.

Professor: Esse arranjo que nós temos aqui tem alguma similaridade com o sistema da aula passada, no entanto, algumas diferenças são evidentes. Isso aqui é uma... Eu tentei representar uma espécie de cuba de onda. Não sei se vocês viram isso em uma aula de Física, no laboratório de Física, mas é bastante simples. Mas nós podemos imaginar isso aqui como sendo uma dessas travessas de pirex que contém água. Só que, nessa travessa, nós temos ali, no meio do caminho novamente, uma barreira contendo uma fenda e, no fundo dessa, do outro lado dessa fenda, nós temos um aparelho aqui sensível à luz, ok? Então, as ondas que chegam aqui nessa superfície, de alguma forma são registradas aqui nessa parede e o sistema está cheio de um líquido. Nós vamos gerar ondas aqui nesse nível por meio de uma pequena esfera apresentada aqui. Essa esfera cai alí no tanque e gera uma onda que vai se propagar ao longo desse líquido e o que nós queremos que vocês façam agora, é representar os eventos que ocorrem no momento que a onda passa por essa fenda, e alcança ali aquela superfície final que é a detectora de ondas, ok? Novamente, vocês têm embaixo à direita..., vocês têm uma vista superior do arranjo no desenho e não está representado aqui no eixo x, é uma falha minha, mas aqui embaixo vocês visualizam a orientação do eixo x, da mesma forma.

Quadro 8 – Exemplo 7: ondas.

Também interlocutor do processo, o professor procura envolver os estudantes na tarefa de explicitarem seus conhecimentos previamente construídos e validados nas aulas de Física ou em outras disciplinas na solução do problema apresentado. Nessa etapa da atividade, buscamos novamente Orlandi (1999) quando sugere teorizar a interpretação, no sentido de compreender como os objetos simbólicos produzem sentidos para os sujeitos. Assim, o professor procura utilizar os "gestos de interpretação" considerados como "atos no domínio simbólico".

A formulação desse preâmbulo tem, certamente, um efeito positivo sobre o desempenho do aluno. Cabe observar que a problemática é a mesma, mudando apenas a entidade física. A expectativa em torno do tipo de atividade a ser proposta, nesse momento, volta-se para o experimento da dupla fenda, agora com ondas. Vejamos como os alunos responderam ou produziram seus modelos mentais.

7.3.2.2 Representações mentais

O professor pede uma representação de probabilidade.

DLU: Então, eu pensei, acho que... totalmente errado, eu imaginei que a onda fosse chegar bem no centro, elas fossem se propagando ali e que elas fossem se juntar toda no centro, só que, depois, ouvindo as outras opiniões eu concordei com a DFP que ela formaria aquele, ela ficaria toda, formaria círculos aqui. Professor: - DLU: uma parábola é uma parábola. (*Interferência do colega: ai depende da força, né?)* É, dependendo da força... não teria tanta força prá chegar no detector. É dependendo da distância de [...] Professor: A DMM falou também? Então vamos ouvir a DMM. DMM: Na primeira onda, eu concordo com a DFP, só que será que essa onda, ela vai ter força suficiente para chegar no anteparo? Eu não sei se ela vai ter, mas a segunda eu discordo, porque eu acho que elas vão se anulando assim a hora que elas começarem a... é que eu não acho que elas vão se juntar, eu acho que elas vão se anulando, porque uma vem daqui e a outra vem daqui, elas se encontram e elas se anulam... Aluna: No momento em que elas saírem pelas fendas, elas vão fazer assim, ó. [diversos comentários]

Quadro 9 – Exemplo 8: ondas.

No Quadro acima, o aluno DLU tenta expor seu modelo, correto do ponto de vista da propagação, mas é influenciado por outras argumentações, rejeita seu modelo e passa a concordar com o modelo da colega. No contexto das tentativas de explicação, todos os participantes do diálogo ficaram confusos com a questão da força da onda. Note-se que esses alunos têm noção de intensidade, mas não conseguem explicitar seus modelos. O professor tenta mediar, todavia vários conceitos precisam ser retomados, portanto, acordos e desacordos entre suas explicações e as proposições de Feynman somente foi possível à medida que as discussões avançaram para níveis mais elaborados.

DFJ: Ah! Sim, elas chegam no mesmo tempo só que, só que [...] não, eu sei, elas estão em fase só que ela vai chegar, tipo assim no anteparo, ela vai chegar assim, não assim... (mostra a figura). Alunos: [...] Aluna: É, pode ser também, ela se forma assim, daí ela vai fazendo assim... (mostra a figura.). (Outro aluno mostra a sua figura.) DFJ: É, pode ser também... Professor: DFB quer falar alguma coisa? Vários comentários (risos) Aluna: Você não quer consultar os universitários? Professor: Você quer consultar os universitários, DFA? Ainda não pode. Professor: Quer falar alguma coisa da sua representação? Aluna: Não, eu concordo com a DFM, de que a interferência não vai ser construtiva, vai ser destrutiva. Elas vão chegar no centro com menos intensidade, mas... na direção das fendas de maior intensidade...

Quadro 10 – Exemplo 9: ondas.

Se levarmos em conta a natureza da interação verbal, na qual diferentes ideias do fenômeno se confrontam, se formam e se reconstróem num processo dialógico que, a cada argumento, um contra-argumento, com os quais são construídas as compreensões.

Embora as propriedades essenciais de ondas (Quadro 7) fossem de domínio desses alunos tanto em situações cotidianas como em atividades formais de aulas, eles não foram, de modo geral, capazes de utilizar a formalidade conceitual na explicação do fenômeno da interferência.

Os exemplos a seguir são modelos mentais representados na segunda etapa da atividade.

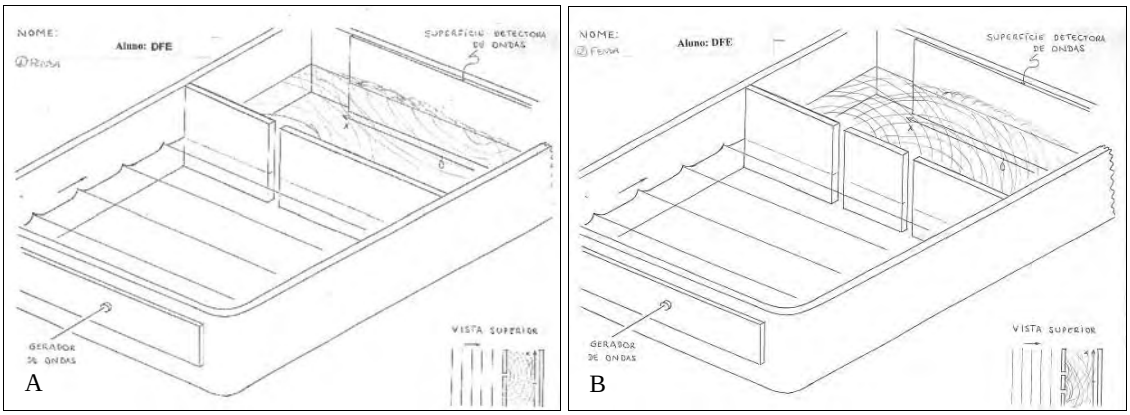


Figura 8 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

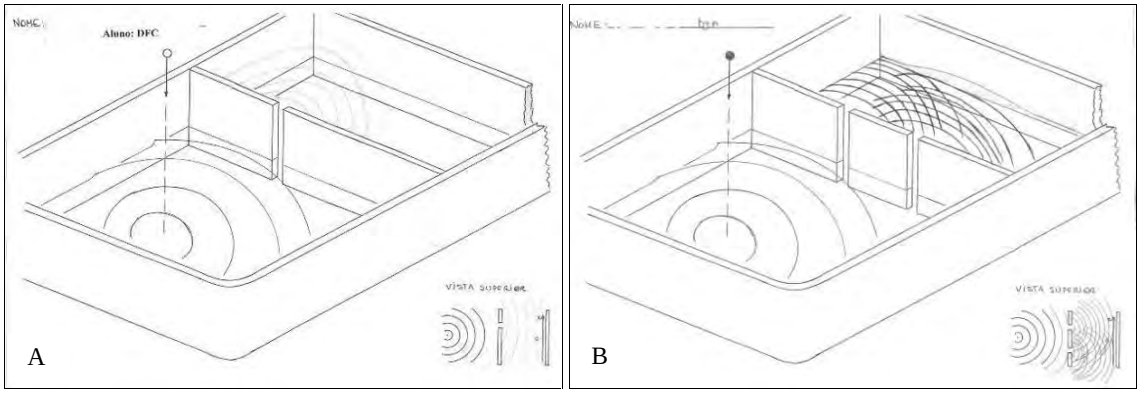


Figura 9 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

A atividade proposta consiste em traduzir em modelos as intenções dos estudantes, ativando conhecimentos armazenados na memória e relacionando-os com a nova situação.

Pelas Figuras 8 e 9, notamos que as representações de movimento ondulatório que os alunos possuem são, de certa maneira, homogêneas, provavelmente pelas noções cotidianas

adquiridas, particularmente de eventos da realidade. No entanto, identificar modelos mentais é possível por meio da identificação dos conceitos e atributos conceituais utilizados pelos alunos, e o que se depreende dos fragmentos dos Quadros 9 e 10 são explicações superficiais, ou as que envolvem apenas alguns princípios físicos, algumas variáveis e como os alunos lidavam com essas variáveis.

Buscamos, nos textos e nas representações dos alunos envolvidos nesta investigação, indícios de seus modelos. Além das representações das Figuras 8 e 9, pesquisou-se também no APÊNDICE A. De maneira geral, para sistema com uma fenda, eles consideraram que as ondas são rápidas e curtas, tornam-se espaçadas até atingirem a parede detector, propagam-se em direção à fenda, e apresentam maior amplitude perpendicularmente à fenda.

Para sistemas com duas fendas, apenas dois alunos consideraram o fenômeno da interferência. Em seus aspectos gerais, a intensidade é maior, depende da distância antes da fenda. Dois desses alunos incluíram em suas explicações o fenômeno da interferência, e dois deles afirmaram que há maior amplitude na direção perpendicular simetricamente às duas fendas. São esses os elementos que formam o modelo mental que esses alunos construíram.

7.3.2.3 Momento da discussão

A Análise de Discurso, afirma Orlandi (1999), trabalha os limites e os mecanismos da interpretação como parte do processo de significação. É nesse sentido que o professor preocupa-se com o enunciado como produto do conhecimento, e tenta separar o discurso dos alunos e o contexto de produção do conhecimento, enfatizando algumas propriedades das ondas, como: *intensidade e interferência de ondas.*

O professor toma o discurso como palavras em movimento, no sentido de tentar produzir sentidos. Quando chama a atenção do aluno com o objetivo de resgatar alguma propriedade, o que ele tenta, na verdade, de acordo com a Análise do Discurso, remeter o discurso às suas condições de produção, à memória que o determina. Portanto, implica rememorar algumas propriedades das ondas, como difração, interferência, transporte energia e outras, que, no decorrer da atividade, são indispensáveis para a compreensão do fenômeno.

Estes fragmentos emergiram das intervenções dos estudantes enquanto o professor apresentava as atividades. Estabelecemos, a partir dessas falas, alguns aspectos que ilustram a comunicação dos estudantes em contexto de ensino/aprendizagem. Os alunos tiveram

dificuldades em entender o tipo de representação gráfica que estava sendo pedido, conforme mostram as passagens que seguem.

É possível identificar, nessa fala, uma questão que não havia sido explicitada na explanação das atividades: qual é a largura (que a aluna entende por tamanho) da fenda? Como nenhuma informação havia sido dada quanto à espessura da fenda, ela passou a ser, corretamente, uma variável que influenciou nas representações.

DFA: [...] igual a da DFP também, só que a gente tem que saber a espessura da parede... Você não vai ter uma grossura da parede que vai dar para desviar com vários ângulos, você vai ter um ângulo só que vai desviar... [...] Professor: E aí no caso da 2ª fenda, o que acontece com duas fendas aí? Muda? O que muda? O que não muda? DFG: O princípio é o mesmo, é... Só que, na hora da construção das ondas aqui, eu tracei uma linha imaginária... Aqui do centro da parede, né, aonde elas vão começar a se unir e sofrer interferência uma a outra e eu acho que elas vão se juntar, a energia de uma com a outra, numa onda só, então, como são duas fendas... Uma onda se divide em duas, mais tarde elas se juntam e formam uma só. DFD: Foi isso o que eu pensei, elas se unem... Vão sofrendo interferência uma da outra, mas conforme vai tendo espaço aqui... Se o espaço for pequeno chega duas frentes de onda. Se o espaço for um pouquinho maior vai chegar uma única onda só, elas vão sofrendo interferência.

Quadro 11 – Exemplo 10: ondas

De acordo com Garcez (1998), o professor, mais que um identificador de problemas textuais, é um propiciador e facilitador da reflexão, na medida em que permite que o aluno seja exposto à interpretação do outro, passando a compreender melhor como seu discurso está sendo lido. Portanto, a forma como está sendo lido reflete a forma como foi construído.

Professor: Todo mundo ouviu o que a DMM falou? Sim? Então vamos colocar na lousa. Tem mais alguma propriedade que vocês podem relacionar aí. Eu gostaria que vocês explorassem um pouco mais o comentário da Paula. DFF: Sobre a parte... Professor: O que significa? E a onda ela é destrutível? Então, há uma propriedade aí que existe na onda e não existe na partícula, existe na partícula e não existe na onda que é o quê? DFA: Não sei... Mas de falar que sofre interferência e não sofre, já não está falando isso? Professor: É, mas eu quero que vocês cheguem a outra noção. Então, do ponto de vista gráfico, como é que vocês distinguiriam essas duas representações que nós fizemos na aula passada e também baseadas nos textos que nós lemos, né. Nós fizemos duas equações na aula passada, uma para partícula e uma para onda, lembram disso? DFP: ...A soma das duas unidades... Professor: No caso de que objeto? DFP: Partículas. Professor: E no caso da onda? DFA: Raiz quadrada...(inaudível). Professor: ...Essa equação ela é uma equação o quê? E o gráfico era um gráfico que..., o que é que se somava DFL? DFJ: Unidades. Professor: E no segundo gráfico? DFE: Intensidade Professor: Ok, que que tinha então? No primeiro gráfico nós fizemos uma representação de... DFF: Probabilidade

Quadro 12 – Exemplo 11: ondas

No Quadro 12, professor e alunos, progressivamente vão buscando sentidos para o contexto considerado. Por outro lado, o esforço do professor e as repostas dos alunos confirmam a tese de que a aprendizagem, como diz Suassuna (2004), não é um processo linear e cumulativo, mas se dá aos saltos, entre idas e vindas, elaborações, reelaborações, reestruturações, avanços e recuos.

A ausência de conectores lógicos que mobilizam conceitos formais pode ser percebida nas respostas em vários momentos. Contudo, os conceitos de onda com seus elementos constitutivos foram trazidos pelos estudantes, o efeito de sentido é dado pelo sujeito, e é na discussão que se pode alcançar o domínio da memória, vozes anônimas e discursos já ditos, que, finalmente, podem significar o discurso.

7.4 Sistema com Elétrons

Nesta terceira atividade, nosso objetivo foi colocar o aluno diante de um paradoxo, ou seja, de um objeto que se comporta de modo estranho, determinado exclusivamente pelas condições experimentais estabelecidas, pois ora ele se comporta como partícula, ora como onda, dependendo do operador do experimento. Sem mostrar, afinal, como se dá o fenômeno de interferência de partículas – comportamento inesperado no mundo macroscópico da física clássica. Vale comentar que esse experimento com elétrons não foi feito exatamente como o proposto por Feynman. Estamos lidando com um tipo especial de experimento, chamado de "experimento antecipatório". Tais tipos de experimentos são conduzidos em nossa imaginação e é possível conhecer os resultados que seriam obtidos destes experimentos por meio de muitos outros que foram efetivamente executados em escala e proporção tais que acabam por exibir os efeitos que serão aqui descritos

7.4.1 O olhar do professor e pesquisador sobre aspectos gerais do desenvolvimento das atividades

A partir da hipótese de que houve consolidação das diferenças entre as duas entidades das atividades anteriores, partimos para a atividade do terceiro dia, que consistiu

em colocar os estudantes em contato com *o mesmo experimento* (Isso foi importante, porque a exceção do tamanho do arranjo experimental, que para elétrons tem que ter dimensões diminutas, as demais características eram as mesmas: uma fenda, duas fendas e um anteparo,). Entretanto, no terceiro dia, o objeto foram os elétrons, que eles aprenderam nas aulas de Quântica e que têm características de *partículas e* de *ondas*, sendo então chamados de *partículas-ondas.*

- Mais uma vez, o professor inicia com a explicação do arranjo experimental e a dúvida, agora, é de importância crucial, já que havia escapado ao professor nas explicações prévias. Os elétrons só vão exibir difração se a fenda tiver largura da mesma ordem de grandeza das partículas. A preocupação dos estudantes em controlar todas as condições que eles conseguem imaginar para o experimento aparece no momento inicial.

Na atividade anterior, o professor, com a ajuda dos estudantes, construiu uma tabela com as propriedades das partículas e das ondas para comparação. Inicialmente, o professor procura fazer com que os alunos consolidem as diferenças no comportamento das duas entidades que foram estudadas nas atividades anteriores: partículas e ondas. É feita uma explanação sobre as atividades, mas a estratégia do professor é a de perguntar o tempo todo. Observe-se que todas as falas do professor são perguntas que vão conduzindo os alunos às conclusões desejadas. Desta forma, surgem conclusões acerca da *intensidade, indestrutibilidade, número de partículas, probabilidades, etc.*, que culminam nas explicações, correspondendo às noções de *contínuo descontínuo, trajetória indefinida trajetória definida, interferência não- interferência*.

Nessa etapa da investigação, há um deslocamento importante, visto passarmos a lidar com contradições. Afinal, como pode o mesmo objeto físico que produz figuras de interferência e que, portanto, deva consistir de ondas, também produza o efeito de partículas? O professor faz apelo a analogias, um sistema de ondas se propagando no mar, a fim de provocar os alunos a explicar mais uma propriedade do sistema, além de acionarem suas representações mentais. Feita a apresentação, a intervenção do professor volta a ser apenas fazer perguntas.

Os alunos tiveram dificuldade de compreender o paradoxo que surge ao se lidar com um sistema de propagação de elétrons através de uma ou de duas fendas, monitoradas por uma lâmpada. O professor apela para a lousa e para o texto a fim de fazer os alunos entenderem o paradoxo. As intervenções são sempre interrogativas. A partir deste momento, os alunos parecem começar a entender que o comportamento dos elétrons

está sendo determinado pelo experimentador ao apagar e acender a lâmpada e que as propriedades de onda ou partícula vão se manifestar separadamente, como função das condições experimentais impostas ao sistema.

Alguns consideraram o elétron como onda e outros interpretaram como partícula. Uma estudante tratou o elétron como partícula e como onda e falava o tempo todo em intensidade do elétron. Já outro estudante considerou o elétron como partícula para o sistema de uma fenda e como onda para o sistema com duas fendas, admitindo, nesse caso, a ocorrência de interferência. Uma aluna fez um questionamento crucial, gerando a necessidade de o professor afirmar a existência da interferência mesmo que apenas um elétron passe pelo sistema de duas fendas ou várias deles passem, mas não simultaneamente.

- Apresentação em vídeo do experimento conduzido pela Hitachi. O resultado experimental obtido pela Hitachi é apresentado a partir da filmagem da tela de um osciloscópio. A gravação mostra um conjunto de pontos que vai se formando lentamente. A filmagem normal levou cerca de vinte minutos, mas, no vídeo obtido na rede, ela é condensada para cerca de um minuto. Na forma como o experimento foi apresentado, cada ponto do osciloscópio corresponde a um único elétron captado no detector. Na sequência, o professor provoca os alunos a interpretarem o resultado visto no osciloscópio. Eles concluem que cada ponto na tela apenas representa um elétron.

Após as argumentações e questionamentos do professor, os alunos concluem que o detector capta os elétrons como partículas. Nesta passagem, fica clara a hesitação dos alunos em responder. Eles percebem que surge um padrão de ondas construído a partir de pontos que representam partículas. O professor questiona os alunos até eles concluírem que há um padrão de interferência (propriedade de onda), gerado por partículas. Os alunos são levados a constatar que, com uma fenda, o resultado é aquele previsto para partículas, mas, com duas fendas, o resultado é aquele previsto para ondas.

O filme é retomado e, em algum momento, o personagem pergunta como é possível que um conjunto de partículas gere um padrão de ondas (interferência) e o professor tenta chamar a atenção dos alunos para a diferença de composição (e de origem) das franjas de interferência formadas por luz e por elétrons.

Insistentemente, o professor tenta fazer com que os alunos compreendam a origem da granulação e percebam que há interferência, mesmo com um elétron passando por vez. Há um debate para se tentar compreender porque ocorre interferência, mesmo que

passe um elétron por vez pelas fendas e o professor instiga o aluno a pensar em como descobrir o caminho executado pelos elétrons.

Os alunos já viram a comprovação experimental do filme no experimento da Hitachi, mas o professor continua perguntando aos alunos até que alguém dá a resposta esperada para resolver a questão de por onde passa o elétron. O professor continua perguntando aos alunos sobre como detectar a posição e obtém a resposta esperada: O movimento dialético acima se deu para preparar os alunos para a nova etapa de discussão experimental, que é a tentativa de observação do elétron. É nessa etapa experimental que o elétron foge da detecção como entidade dual (partícula-onda) e só vai se manifestar ou como partícula, ou como onda. Finalmente, a animação, contendo o observador, é passada ao aluno.

- Finalizada a apresentação da animação, vem a leitura do texto de Feynman e explicações do professor em alguns momentos. O professor apela para a formulação da hipótese de que os elétrons se dividem, a fim de tentar explicar a figura de interferência.

É possível perceber que o professor dialoga para que os alunos formulem as hipóteses e as coloquem em teste. O professor busca tornar evidente a incoerência dos resultados com uma ou duas fendas abertas, no caso da figura gerada no experimento com elétrons. Procura discutir como mudam os resultados na presença de uma lâmpada que atua como detector. Após longa discussão e argumentação, os alunos compreendem que o simples fato de usar uma lâmpada para detectar elétrons é capaz de modificar seu comportamento, de onda para partícula.

Após um longo debate, os alunos concluem que os fótons muito energéticos emitidos pela lâmpada destroem o arranjo de interferência e que, se houvesse elétrons que não colidiram com fótons, eles iriam exibir interferência. Nesse momento, houve uma longa discussão dominada pela intervenção de só um aluno, mostrando o colapso na detecção se diminuída a energia dos fótons da lâmpada. O professor reúne o resultado geral do experimento e usa esse resultado para introduzir o princípio da Incerteza de Heisenberg e, demoradamente, procura explicar os resultados da Mecânica Quântica e tenta “salvar o experimento a partir do Princípio da Incerteza”.

Uma longa discussão sobre a finalidade dos experimentos pensados e, finalmente, o aluno conclui corretamente que só se pode falar da representação após a colisão na parede, ou seja, o resultado. A definição se dá após haver ocorrido um evento completo. Uma vez concluído que não há possibilidade de descrever/representar o objeto

partícula-onda de modo analógico, o professor instiga os alunos até que concluam que a única representação possível é a representação matemática.

Orlandi (1999) destaca que a Análise do Discurso trabalha os limites e os mecanismos da interpretação como parte do processo de significação. É de se notar que, nas três etapas de iniciação das atividades, quais sejam, com partículas, com ondas e com elétrons, houve predominância da inferência do professor no sentido de estimular as formações imaginárias.

7.4.2 Fragmentos da fala

Como já referido, por questões didáticas e operacionais, fragmentamos o diálogo de maneira a exemplificar situações que denotem a importância da comunicação em sala de aula.

Os exemplos a seguir tratam de conceitos que evidenciam certa complexidade, e falar sobre eles parece tarefa difícil para estudantes com pouca familiaridade com escritas e leituras diversificadas. Esse aspecto, a que já fizemos referência ao tratar da circularidade dos argumentos nas atividades anteriores, merece maior ênfase. Outro aspecto a destacar sobre a importância do desenvolvimento e análise da Física Moderna é a experiência a demonstrar que os conceitos da linguagem cotidiana, afirma Heisenberg (1987, p. 150), "mesmo imprecisamente definidos como eles são, parece exibir uma estabilidade maior na expansão do conhecimento que os termos precisos que a linguagem científica ostenta". Não há como discordar do autor, uma vez que todo entendimento deve, em última instância, basear-se na linguagem comum, e tão somente por meio dela estaremos seguros de tocar a realidade.

Considerando a ideia de explorar as representações e a linguagem escolar, devem-se assegurar as conexões naturais e construídas que permeiam os conhecimentos científicos e que se organizam em torno de questionamentos, solução de problemas, debates e outras formas que integram saberes a ensinar a saberes ensinados.

7.4.2.1 O professor

Bem, vocês acompanharam. Alguns de vocês acompanharam por algum tempo, a presença da pesquisadora na minha sala, nas nossas aulas, e ela acompanhou praticamente todo o primeiro semestre [...] enquanto eu estava abordando... [...] trabalhamos com radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico..., mas, a partir daí, eu comentei com vocês de uma maneira até bastante curta, bastante rápida, o chamado princípio da incerteza... a determinação absoluta da posição e momento de uma determinada partícula atômica, no caso o átomo, e comentei com vocês a necessidade de a gente trabalhar com um modelo probabilístico do elétron... E aí eu falei, olha! O modelo probabilístico que vamos trabalhar é o modelo que leva em conta... resolver a equação de Schrödinger... Os resultados da equação de Schrödinger que são funções de ondas... quadrado da função de onda, descreve uma função de probabilidade. Ok?

Quadro 13 – Exemplo 12: elétrons.

Tendo em mente a discussão atual sobre os desafios contemporâneos no contexto da comunicação verbal e escrita, tomamos como objeto de exposição teórica, o discurso, considerando a grande dificuldade que o aluno tem de promover a circularidade dos conhecimentos. Como se pode denotar do fragmento anterior e do próximo, o professor faz uma explanação sobre o objeto físico (elétron) em discussão, na tentativa de envolver intelectualmente, mas também afetivamente os estudantes.

Professor: [...] este sistema está emitindo elétrons... é a informação que eu estou te dando... Está emitindo elétrons como se fosse uma metralhadora de elétrons e o que nós pedimos para vocês agora, adivinhem! O óbvio, nós pedimos para que vocês representem aqui a distribuição desses elétrons. Aluno: Eu devo considerar o elétron como partícula ou como onda? Professor: A escolha é sua, eu não posso opinar... DFG: Aí pega. Professor: Estava indo tão bem, né...: [inaudível] Professor: Não, esse é um autêntico experimento mental, nós vamos discutir esses experimentos que vocês estão fazendo aí.

Quadro 14 – Exemplo 13: elétrons.

Quando o aluno pergunta se deve considerar o elétron como partícula ou como onda, parece que há elementos suficientes que possam confirmar se a resposta do professor induziu a escolha por partículas ou por ondas. Nota-se que, quando o professor responde: "a escolha é sua" está admitindo que o aluno deva opinar por uma situação ou outra. Na verdade, é desse tipo de inferência do professor que o aluno pode tirar uma conclusão imaginária que pode ser prejudicial na solução do problema. Temos, então, a memória do já-dito, interdiscurso. Como lembra Orlandi (1998), o sujeito, para fazer sentido, entra em certo discurso ou discursos que constituem os processos discursivos: sua inserção na memória discursiva se dá por filiação e não por aprendizagem.

Professor: O DFT tá querendo falar...
Aluno: [...].
Professor: Eu vou convidar um para falar.
DFF: Deixa que eu falo, professor.
Professor: Ah DFF, fala um pouco para nós DFF.
DFF: Eu pensei assim oh, que alguns passaram reto, e um [...] parte do anteparo não passaria para lá... (Professor: gostaria de mostrar sua figura para o resto da turma? Não? então depois você me fala!) alguns atingiriam aqui e eles chegariam ao ponto zero, mas o máximo seria [...] e o segundo...
Professor: Mostra a figura pro DFN, DFF
DFF: Aqui seria a maior carga [...] gráficos
Aluno: Professor!
Professor: Fala!
Aluno: [...].
Professor: [...].
Aluna complementa dizendo que fez o desenho semelhante à luz, você tem a luz, tem uma caixinha e ela passa por um pedacinho [...].
DFT: Eu pensei que o elétron tivesse o comportamento que tem uma onda, mas para entrar nessa fenda... o mínimo e o máximo...<mostra o desenho> não vai dar pra entender muita coisa (risos). Olha aqui como se fosse uma onda se ela chegasse no anteparo [...] o contrário, o máximo seria aqui e o mínimo aqui, e aqui, pra mim, seria a mesma coisa, só que no meio seria o máximo <legal>.
DFN: Eu fiz igual ao do Paraíba,<risos>, mas considerei que o elétron é como se fosse uma partícula e não como uma onda, e considerando todos os desvios da fenda aqui, porque se você tem um desvio aqui, aqui vai dar ½ e aqui vai dar 1½, portanto no meio vai ter maior intensidade, e você tem esses outros desvios que ficam mais no canto, portanto você tem uma probabilidade ao lado desses desvios. (risos)
Professor: Quem mais gostaria de se apresentar publicamente?
DFC: Cada ponto corresponde a um elétron?
Professor: O DFC acha que cada ponto corresponde ao elétron. O resto concorda, discorda?
DFC:...
Professor: Nós vamos continuar falando dessa palavra que ele usou: corresponde, ou não é bem corresponde? Nós vamos discutir aqui na minúcia, esse experimento aqui, a gente não pode ter muita pressa agora não. Cada ponto efetivamente, eu vou formular a pergunta de tal maneira que você possa responder melhor DFC. Cada ponto ali é um elétron?
DFC: Seria...
Professor: É o elétron, quer dizer, o que nós estamos olhando, aqueles pontinhos mais claros, cada um daqueles pontinhos é um elétron? O que vocês acham? Nós estamos olhando os elétrons alí? Essas imagens alí são elétrons?
DFG: Não
Professor: Então cada imagem ali, cada ponto clarinho que apareceu sobre essa tela não é um elétron, todo mundo concorda com isso? Então, de fato..., mas existe alguma coisa entre cada ponto e cada elétron que o DFC falou agora a pouco, que expressão ele usou?
"Aluno"
Professor: Outra expressão que você tinha usado, mas não gostou, você resolveu reformular.
"Aluno"
Professor: Ok! De fato, cada ponto corresponde a um elétron? Sim, cada ponto corresponde a um elétron. Então veja, a primeira coisa importante aqui que nós vamos voltar a discutir lá na frente é o seguinte: o nosso experimento, ele não nos mostra os elétrons, porque os elétrons na realidade, não vão aparecer diretamente na tela do osciloscópio para nós, mas entre o osciloscópio e o próprio elétron tem um equipamento, que equipamento que é esse?
DFC:...
Professor: Fala de novo DFC.
DFC:...um detector.
Professor: Um detector, então existe um fato físico alí, que transforma um fato analógico, que é a colisão do elétron seja ele que for com o detector, transforma isso num resultado que a gente possa visualizar aqui, OK? Então, nesse arranjo experimental, esses elétrons estão sendo detectados como o quê?

Quadro 15 – Exemplo 14: elétrons

Como era de se esperar, as dificuldades em lidar com entidades microscópicas estão evidentes, nesse sentido, a mediação do professor consistiu em dialogar com as palavras dos alunos, tentando, de modo mais ou menos criativo, facilitar a experiência discursiva. O

desafio posto nesse momento é entender exatamente o heterogêneo, a explicação dos componentes conceituais que cercam o fenômeno com elétrons que, em princípio, da forma como os alunos os concebem, seriam considerados erros, desvios, falhas ou contradições.

O Quadro 15 explicita o papel do professor, que busca, na heterogeneidade das falas, possibilidades de entender certas diferenças nos processos de aprendizagem. O professor tenta, nesse momento pedagógico, romper com o lugar do autorizado, do previsto e da escamoteação do diferente. Todas as falas são respeitadas e, no contexto da discussão, tenta restaurar os possíveis sentidos que implicam aprendizagem significativa e na confluência dessas vozes, a recusa a dizer, o silêncio, tal como proposto por Orlandi (1997), implica em observar o que não está sendo, ou não pode ser dito.

7.4.2.2 Representações Mentais

Os estudantes transitam, sobretudo, nos níveis de comunicação intraindividual e intrapsicológico. Nesse aspecto, eles procuram compreender, nos gestos de interpretação, como os objetos simbólicos produzem sentidos. De certa forma, eles acionam o nível interindividual quando expõem suas dúvidas, de maneira aberta, não apenas para o professor, mas para os colegas participantes. Há certa dificuldade por parte do professor em manter o diálogo, respondendo aos questionamentos dos alunos, sem interferir muito nas representações mentais desses alunos sobre o fenômeno estudado.

Professor: Pode desprezar. A resistência do ar, o sistema está sobre vácuo nesse caso. Pode desprezar a carga elétrica, o sistema está sobre vácuo. DFE: ...uma metralhadora, então, não vai poder acontecer uma interferência? Aí seria uma de cada vez, né? Professor: Ela emite...vamos admitir que a metralhadora emite um elétron por vez. O máximo de informação que eu posso te dar nesse momento, viu Mateus. Você está argumentado exatamente o que, nesse caso? DFE: completando com uma onda, por exemplo, um elétron aqui... não teria como competir com outro elétron. Professor: Entendi sua colocação. DMM: Porque seria um de cada vez na onda. Professor: Entendi a sua colocação, é importante que você elabore essa ideia no texto que você vai representar. Essas suas dúvidas inclusive, coloque no texto. Interrompe DFG: No caso do elétron, como nos projéteis considera que ele bate na borda e muda sua trajetória, ricocheteia ou não? Professor: A representação e a escolha são suas. Esse professor está de sacanagem, não fala nada!!! DFG: Você tem que ter as condições... Tem que ter ou não? Você falava... e se... Professor: No entanto, o que tínhamos no primeiro texto? Que entidade física e aqui nós temos o quê? Eu não vou dar a resposta. Aluno: estou considerando como partícula. Professor: Eu não disse para você não fazer isso. Professor: Escrevam, manifestem todas as angústias as dúvidas e as condições que estão imaginando para o sistema, né Neide? Se for isso é assim, se for aquilo é assado... não tem nenhum impedimento aqui para vocês. [...] DFG: Pode colocar as dúvidas?

Quadro 16 – Exemplo 15: elétrons

O Quadro 16 mostra um pouco do dilema que o aluno enfrenta na escolha do comportamento do elétron. Parece claro que o raciocínio empregado no fragmento acima se aproxima, em certa medida, do percurso de Feynman, no entanto Feynman, discutindo o comportamento corpuscular e o ondulatório, estabelece o paradoxo.

A explicação para os dois casos, considerando partículas ou ondas, parece fácil, porém tal paradoxo só pode ser explicado por meio da formulação matemática. Contudo, os alunos, em suas representações, rapidamente fizeram opção, admitindo o elétron como partícula ou como onda. Note-se que os alunos percebem o paradoxo, mas não buscam a solução em termo dessa problemática, isso pode ser visto nas representações que seguem.

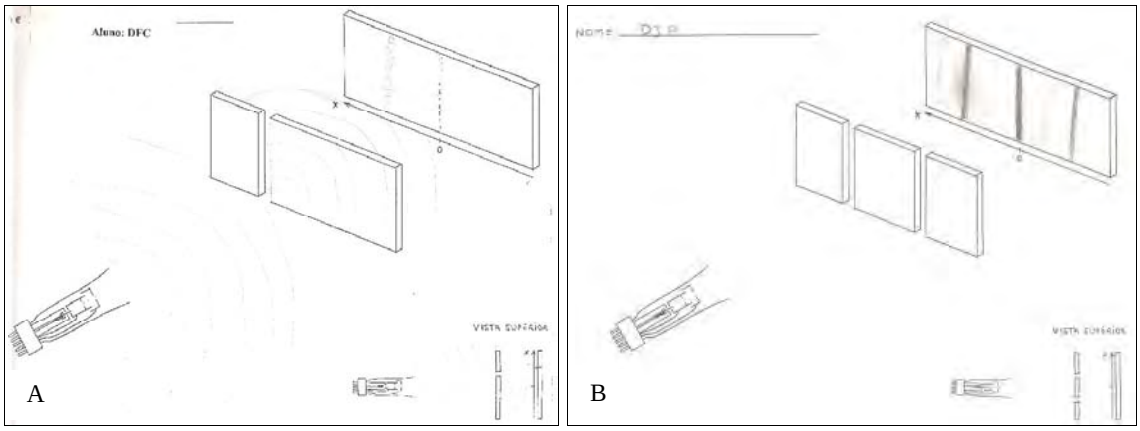


Figura 10 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

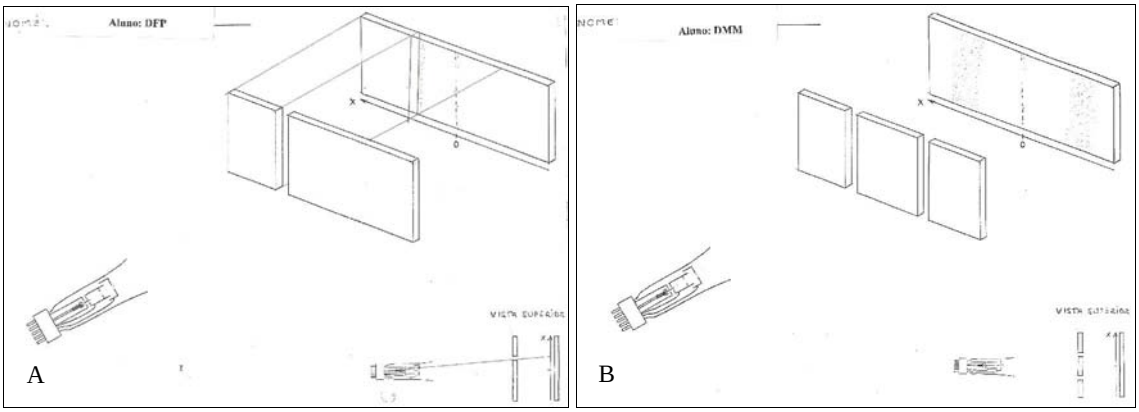


Figura 11 – Representação mental: sistema uma fenda (A) e sistema duas fendas (B)

Nas Figuras 10 e 11, as representações dos alunos são similares aos modelos propostos por eles nas elaborações das atividades anteriores, partícula ou onda. Os conflitos com relação à possibilidade de ocorrer ou não interferência num experimento com partículas inteiras, não são trazidos pelos alunos. Por analogia com o experimento da etapa 2 (com ondas), eles concluíram que há interferência com elétrons. Se o professor não admitir várias hipóteses e discutir a inviabilidade, por exemplo, neste caso, a falta de energia disponível para fragmentar elétrons em duas partes de maneira que um passe pela fenda 1 e o outro pela fenda 2. De igual forma, porque há pontos de mínimo na curva de interferência, que correspondem à chegada de poucos elétrons, mesmo com as duas fendas abertas. E frente a um observador, como se comporta o elétron?

Os modelos mentais representados nas Figuras 10 e 11 poderiam ser discutidos até que os alunos reelaborassem melhor seus conhecimentos de natureza dual do elétron, de maneira tal que facilite sua compreensão da mecânica quântica em algum momento de sua aplicação.

Essa etapa do experimento é rica em possibilidades conceituais, em hipóteses que podem ou não se confirmar e como explica o próprio Feynman, o experimento com suas múltiplas possibilidades nos deixa num beco sem saída se não apelarmos para a formalização matemática da explicação quântica.

7.4.2.3 Momento da discussão

O discurso é tomado como conceito teórico-prático e social pela Análise do Discurso. Maingueneau (1997) considera que o discurso sempre remete à formação discursiva, e esta é ideológica, e é por essa via que a linguagem adquire e produz sentidos.

A atividade nesta etapa mostra seu caráter abstrato e polêmico e pode ser depreendido das intervenções dos alunos. Isso nos leva a supor que, se levarmos em conta o cotidiano de aula desses estudantes, é possível interrogar o ensino havido na perspectiva de descobrir novas alternativas didáticas, novos modos de operar com a linguagem em sala de aula, de maneira a ampliarem as possibilidades de conhecimentos científicos e como forma de diálogo com o mundo.

Destacamos, a seguir, fragmentos que ilustram, de maneira geral, o dialogismo e a polifonia, conceitos intrínsecos à produção da linguagem. Trata-se de um conceito pensado por Bakhtin, pelo qual se pode estabelecer um paralelo com dialogismo/polifonia e o conceito de interdiscurso proposto por Maingueneau (1997).

Professor: [...] e, no entanto, depois de certo tempo de experimento, está lá o padrão de interferência. Inclusive o DFF estava aqui na atividade passada e eu me lembro que entre o DFF e o DMM houve essa discussão, alguém de vocês falou o quê? O que é importante no caso da ocorrência da interferência, no caso da onda? No experimento de onda, nós tínhamos duas fendas, e estava vindo a onda, o que foi chamado a atenção, não sei se foi o Guilherme, para que houvesse padrão de interferência no momento em que aquela primeira onda atinge aquelas duas fendas alí. Alguém de vocês falou uma coisa importante, acho que foi o Fernando. DFF: Eu tinha dito que se fosse um elétron na frente do outro, acho muito difícil que ele fique... no meio, porque não seria as duas ondas juntas. Professor: Portanto, elas têm que se originar..., na sua concepção tinha que se originar no movimento simultaneamente nas duas fendas, ok? No entanto, se a gente faz o experimento removendo essa simultaneidade, isto é, lançando um projétil ou um elétron por vez até lá, o que vai acontecer ao final de certo tempo? Um padrão de interferência. DFG: A onda, ela vai no experimento de duas fendas, ela é uma onda só que ela se divide em dois, por isso surge interferência, o elétron se pensar como partícula, ele não vai se dividir em dois, quando passa pela fenda. Professor: A gente pode refletir sobre essa hipótese. Vamos refletir sobre essa hipótese dele se dividir em dois. DFC: Porque pensa como ele vai causar interferência, pra causar interferência são dois... Professor: Duas entidades. Aluno: Duas entidades, o elétron vai chegar alí, tá em uma fenda e vai se dividir para ir para outra fenda... É o que a gente pensa.

Quadro 17 –Exemplo 16: elétrons

O processo dialógico instituído se dá por meio das alusões aos recurso figurativos. A força dialógica implícita neste fragmento de texto é constituída de múltiplas vozes, portanto, de múltiplas formações discursivas.

Nesta terceira atividade, nosso objetivo foi colocar o aluno diante de um paradoxo, ou seja, de um objeto que se comporta de modo estranho, determinado exclusivamente pelas condições experimentais estabelecidas, visto que ora ele se comporta como partícula, ora como onda, dependendo do operador do experimento. Sem mostrar, afinal, como se dá o fenômeno de interferência de partículas – comportamento inesperado no mundo macroscópico da física clássica.

Professor: Um detector, então existe um fato físico alí, que transforma um fato analógico, que é a colisão do elétron seja ele o que for com o detector, transforma isso num resultado que a gente possa visualizar aqui, ok? Então, nesse arranjo experimental, esses elétrons estão sendo detectados como o quê?
DFI:...
Professor: Alguém duvida? Você está falando isso justamente pelo quê?
Professor: Ou seja, está havendo uma correspondência entre cada ponto e cada elétron, ok? Então o sistema está aí, esse nosso arranjo está ok. Esse nosso arranjo experimental está detectando o elétron como o quê?
DFC: [...]
Professor: Pode falar de novo DFC.
DFC: partícula.
Professor:. Como partícula, ficou claro isso para vocês? Soltem-se, podem ficar à vontade, podem chutar, podem errar, não tem problema nenhum, tá. Muito bem..., então vamos dar mais uma continuação.
"Animação"
O que aconteceu no final do experimento?
DFG: ... faixa de elétrons.
Professor: Esse padrão passou a ser um padrão de quê?
DFG: De onda
Professor: Ok? Um padrão de onda, em algum fragmento, alguma parte do texto, eu não sei se vocês compreenderam o autor, possivelmente não, eu não sei quantas vezes vocês ouviram um japonês falando inglês, foi o caso agora. Nós temos um japonês.
DFS: Professor!
Professor: Oi!?
DFC:...
Professor: Aleatório.
[...]
DFC:...
Professor: É na realidade..., esse fragmento..., só um minutinho.
"Animação"
Professor: Eu não sei parar esse filme... Vamos discutir isso aqui um pouquinho mais adiante viu DFC, deixa só eu pegar um trecho importante aqui.
"Animação"
Professor: Olha, na realidade, este experimento, este resultado experimental, ele era previsto, ele era previsto, mas, no entanto, até a data em que a Hitachi executou o experimento, não se tinha obtido esse experimento, ok? O experimento, efetivamente, comprova uma antecipação que tinha sido feita a partir do resultado experimental, a partir do experimento de pensamento, não sei se era essa sua dúvida DFC, eles não se surpreenderam com o resultado, na realidade, tentou-se executar o experimento justamente porque se previa que o resultado fosse esse. Ok?
Bom, nós temos no final das contas então um resultado que mostra um padrão de quê?
[...]
DFJ: Interferência
Professor: Só que esse padrão de interferência, como ele foi se formando? Foi se formando na tela do osciloscópio da Hitachi, ele foi se formando a partir do quê?
DFJ:...
DFC: Do choque de elétrons.
Professor: Do choque de?
DMM: Elétrons
Professor: Que foram detectados como o quê?
DFA: Partículas
Professor: Como partículas individuais. Não sei se vocês perceberam isso. Então, nós temos um padrão de interferência, que é um padrão similar àquele gerado por luz, por exemplo. Eu sei que vocês trabalharam com luz, interferência de luz no laboratório de física, ele é formado do mesmo jeitão que o padrão de luz ali, olha o formato e a distribuição de ondas de bandas ali, né, de interferência, de brilho máximo e mínimo. É até similar, mas quando a gente olha para aquele feixe de luz, a gente observa que diferença com relação a essas figuras que estão aqui? Essas figuras elas são o quê? Essas faixas, cada uma dessas faixas, são perfeitamente lisas e homogêneas? Elas são o quê? Foram geradas pelo que, no osciloscópio?
DFJ:...
Professor: Nós temos uma granulação na figura. No caso da observação do experimento com luz, nós temos essa granulação? Não, não temos essa granulação. Então, nós temos aqui um exemplo de que sistema que está gerando interferência ou que entidade física que está gerando interferência?
Aluno:

Professor: Uma entidade física que está sendo detectada como o quê? DJF: Partícula. Professor: Como partícula? DJF: ... Partícula. Professor: A partícula, a detecção da partícula, as partículas estão exibindo um padrão de quê? DJF: Padrão de onda. Professor: Um padrão de onda! Era previsto esse resultado? DJF: Acho que sim. Professor: Por quê?

Quadro 18 – Exemplo 17: elétrons

No Quadro 18, fica evidente a dificuldade que o professor teve ao tentar trazer os argumentos que eliminam as hipóteses postas durante a discussão. Não foram hipóteses prévias, mas introduzidas à medida que se buscavam as respostas para o comportamento do elétron. É importante notar que a animação nos momentos anteriores não causou tanta polêmica, mostrava-se um recurso interessante para visualização do fenômeno. Evidentemente que todos os recursos utilizados nas atividades conduziram a uma reflexão mais elaborada acerca dos fenômenos clássicos e quânticos e o ganho em termos de compreensão foi, sem dúvida, significativo em vários sentidos. Em termos de comunicação verbal, prática pouco utilizada pelos estudantes, foi também importante, da qual destacamos alguns termos que devem ser trabalhados para que tenham significados na linguagem científica.

7.5 Linguagem Coloquial x Linguagem Científica

De maneira geral, as falas decorrentes da sequência didática denotam alguns aspectos comuns da linguagem coloquial, que devem ser levados em conta para que produzam sentidos, ou seja, devem ser remetidos às condições de produção do conhecimento científico. Alguns termos podem ser destacados, entre eles: amplitude, intensidade, viscosidade, propagação da onda, que aparecem repetidamente de forma ininteligível na fala do aluno, mas que não devem ser considerados erros. Ao invés disso, o professor deve, sempre que possível, tentar significar a fala, buscando a linguagem formal.

Considerando a ideia de explorar a linguagem escolar, devem-se assegurar as conexões naturais e lógicas que permeiam os conhecimentos científicos e organizam-se em

torno de questionamentos, solução de problemas, debates e outras formas que integram saberes a ensinar a saberes ensinados.

Linguagem coloquial	Significação possível
a. [...] é um líquido *normal*	Referência à água ou características dos líquidos quanto à viscosidade provavelmente.
b. [...] eu acho que eu tenho o *espaço* da fenda...	Largura da fenda
c. [...] como é um líquido, ele está vindo aqui numa onda, daqui sai um *pedaço* e ela vai se propagando.	Pedaço para explicar a propagação e o fenômeno da difração.
d. [...] a onda vai *aumentando.*	Vai sofrendo difração.
e. [...] daqui, vai se *acoplar* com a outra onda e vai bater também inteira.	Vai interferir com outra onda...
f. [...] eu não fiz o *caminho*, eu só fiz o *caminho* na vista superior.	Frentes de ondas.
g. [...] ficou muito curta a distância, ou também ficou muito *forte* a onda, ou talvez chegue só um *pedaço*, mas se ela for voltar.	Amplitude.
h. [...] chegue só um *pedaço* [...], mas se ela for voltar, a onda vai voltar e ela vai bater na outra parede e vai voltar, assim...	Falta de linguagem para descrever o processo como um todo, já que não há "pedaços"de onda.
i. [...] elas vão *passar juntas* então ela vai *estar no mesmo*, sei lá...	As ondas vão estar em fase.
j. [...] no primeiro caso quando a onda vai passar pelo *furo* aqui...	Fenda.
k. [...] Eu acho que vai passar pela fenda e vaie propagar como se tivesse *nascido*...	Gerado (concepção animista).
l. [...] Aí, assim, *vai sair* em círculo...	Vai se propagar.
m. [...] Aqui nas *partes laterais* assim vai ter menos amplitude...	Propagação não frontal à fonte geradora.
n. [...] vai ser *maior* aqui, na direção da fenda...	Vai ser *mais intensa.*
o. [...] a onda que vai bater na parede vai meio que *morrer* e a que passar pela fenda vai continuar a ter amplitude, mas ela vai perturbar...	Um pouco de animismo associado aos termos: bater e morrer. Referência à interferência destrutiva ou à dissipação de energia.
p. [...]'no caso da primeira fenda, eu não fiz ela *redondinha,* mas ela passa, vai ficando, né...	Frente de onda circular.
q. [...] ela teria uma *força* maior que ia ficando mais juntas e chegariam com uma *força* maior aqui...	Amplitude / energia.
r. Aí depende da *força* né... e dependendo da *força*...	Amplitude / energia.
s. [...] será que essa onda, ela ai ter *força* suficiente para chegar no anteparo?	Energia.
t. [...] eu discordo porque eu acho que elas vão se *anulando*. [...] elas se encontram e elas se *anulam*.	Interferência destrutiva.
u. [...] As duas partículas não se juntam e formam uma só e a onda se *junta* e forma uma só...	Sofrem interferência.
v. [...] duas ondas, elas vêm e elas *acabam* ou elas se *somam*...	Sofrem interferência destrutiva ou construtiva.
w. [...] elas se *somam* e formam uma *maior*...	As amplitudes se somam.
x. [...] a partícula ela não se destrói e nem gruda uma na outra e forma uma maior, é isso.	Não sofre interferência.

Quadro 19 – Linguagem coloquial x linguagem científica

Diante desses recortes textuais, é fundamental ver neles sua discursividade, de modo a atingir os efeitos de sentidos produzidos no material simbólico em questão. Nesse sentido, não é a organização do texto que nos interessa, mas a sua discursividade em relação às coisas. Por isso, pela Análise do Discurso, podemos fragmentar e trabalhar com os recortes discursivos que contêm processos significativos importantes.

7.6 Análise Textual Discursiva

Os textos que materializam a ordem do discurso nesta atividade serão representados tanto como recortes textuais ou tomados em toda sua extensão. Concordamos com Orlandi (1999) que a Análise do Discurso não precisa ser feita do texto inteiro, recortes textuais são suficientes, já que podem conter processos significativos do objeto em análise. Os estudantes tiveram oportunidade de expressar suas concepções e conhecimentos e, assim, descrever e interpretar a realidade não observável. Nesse aspecto, buscaremos nos discursos identificar algumas premissas, segundo o modelo de aprendizagem de Johnstone (1997-1999).

Considerando as especificidades da análise, apresentaremos os textos na íntegra, por se tratarem de produções com apenas algumas linhas. Faz-se necessário também, neste momento, trazer aspectos das representações dos sujeitos elaboradas no primeiro momento, uma vez que os textos em análise são produtos daquele momento. Foi produzido um total de cinquenta e sete textos que correspondem a um texto para cada entidade física: partículas, ondas e elétrons, em cada etapa. Nosso objetivo é encontrar elementos indicadores do processo discursivo em termos de coerência e aspectos formais da língua que sirvam de reflexão para o ensino dos conhecimentos científicos. Desejava-se encontrar na produção textual algumas ideias que possam contribuir para melhor significar as representações dos sujeitos envolvidos no processo.

Na análise dos textos, vamos priorizar algumas concepções de discurso, entendidas como processo sócio-histórico, portanto, que guardam as marcas do contexto em que foi produzido. A nosso ver, entretanto, para compreender os sentidos do discurso, é fundamental conhecer em que condições ele foi produzido.

Como já explicitado, os textos foram utilizados com o intuito de trazer à tona elementos que não são visíveis nas representações dos estudantes. Isso se revela um contínuo de produção discursiva, um cenário polifônico, fato que deverá ser levado em conta na interpretação e na análise dos dados obtidos.

De maneira geral, as dificuldades que se depreendem das elaborações dos estudantes podem encontrar justificativas naquilo que Certeau (1999) aponta como inconveniência do método científico tradicional, a abstração dos dados e documentos, tendo como base seu contexto histórico. Nesse sentido, nas ciências da natureza, há um distanciamento entre as práticas da comunicação oral e escrita cotidianas.

Os exemplos a seguir tratam de conceitos considerados fáceis nessa etapa do curso, mas também evidenciam certa complexidade ao falar sobre eles, e parece tarefa difícil para estudantes com pouca familiaridade com escritas e leituras diversificadas. Esse aspecto, a que já fizemos referência ao tratar da circularidade dos argumentos nas atividades anteriores, aqui, merece maior ênfase. Outro aspecto a destacar sobre a importância do desenvolvimento e análise da física moderna é a experiência a demonstrar que os conceitos da linguagem cotidiana, esclarece Heisenberg (1987, p. 150), "mesmo imprecisamente definidos como eles são, parece exibir uma estabilidade maior na expansão do conhecimento que os termos precisos que a linguagem científica ostenta". Não há como discordar do autor, porque todo entendimento deve, em última instância, basear-se na linguagem comum, e tão somente por meio dela estaremos seguros de tocar a realidade.

Considerando que, nas três etapas da atividade, o aluno fez uso da linguagem escrita, adaptamos algumas categorias de Sardà-Jorge e Sanmartí Puig (2000):

I – Dados: são os fatos e fenômenos sobre os quais é construído o texto argumentativo;

II – Justificativa: razão principal do texto que permite passar dos dados à conclusão;

III – Conhecimento científico: conhecimentos básicos específicos que validam a justificativa;

IV – Conclusão: valor final que se quer assumir com base na tese inicial;

V – Exemplificação: relação entre ciência e vida cotidiana.

Tais categorias foram consideradas ao se levar em conta que se constituem elementos básicos indispensáveis para tornar qualquer texto inteligível. Não é intenção, portanto, investigar regras de ensino de produção textual sob a perspectiva do campo da linguística. Cabe lembrar que os sujeitos elaboraram seus textos como forma de comunicação escrita acerca da atividade da dupla fenda, já mencionada. Assim, a produção textual foi elaborada num contexto imediato, totalizando 57 textos sobre a temática por eles vivenciada.

Pela triangulação dos dados, analisaremos a distribuição quantitativa das produções textuais de acordo com as entidades físicas: partículas, ondas e elétrons, considerando as categorias propostas.

Dos 57 textos produzidos, constam desta distribuição: 17 textos sobre partículas; 13 sobre ondas e 17 sobre elétrons. Não foram considerados aqueles que não se adequavam às categorias propostas.

Tabela 1 – Produção textual: partículas

Categorias	Ocorrências		
	Aborda satisfatoriamente	Aborda parcialmente	Não aborda
I – Dados	05	12	-
II – Justificativa	10	03	04
III – Conhecimento científico	03	07	07
IV – Conclusão	11	04	02
V – Exemplificação	01	01	15

Tabela 2 – Produção textual: ondas

Categorias	Ocorrências		
	Aborda satisfatoriamente	Aborda parcialmente	Não aborda
I – Dados	05	07	01
II – Justificativa	09	02	02
III - Conhecimento científico	04	07	02
IV – Conclusão	09	02	02
V – Exemplificação	-	03	10

Tabela 3 – Produção textual: elétrons

Categorias	Ocorrências		
	Aborda satisfatoriamente	Aborda parcialmente	Não aborda
I – Dados	03	13	01
II – Justificativa	07	03	07
III - Conhecimento científico	04	07	06
IV – Conclusão	-	17	-
V – Exemplificação	01	02	14

Se compararmos os quadros acima, notamos que, quantitativamente, o número de ocorrência das categorias não se altera de maneira significativa para as três entidades físicas consideradas. Nessa perspectiva, a única categoria que se diferencia em termos desejáveis é a conclusão para a entidade *partícula* com um total de 11 textos. Se cruzarmos esse dado com as representações gráficas dos elétrons, contraditoriamente, o aluno assume uma conclusão. Nossa

análise não deve ser conclusiva, haveria necessidade de novas investigações para ter clareza do por que o aluno assume o elétron ora como partícula ora como onda.

Nas demais categorias, podem ser notadas tanto uma carência acentuada como excesso de textos com características que pudessem indicar certa coerência nas produções textuais dos alunos. Vistos nessa perspectiva, a grande maioria das elaborações revela características de uma produção decorrente, provavelmente, da falta de oportunidade que o aluno tem de fazer uso de estratégias de ensino que incentivem a escrita.

Em termos dos conhecimentos específicos que visavam consolidar as propriedades de *partículas* e *ondas*, não é possível, de modo geral, encontrá-los claramente nos textos. Contudo, se buscarmos nas representações analógicas e gráficas, é possível identificar tais propriedades que, de certa forma, validam nossa intenção de resgatar conhecimentos da mecânica clássica. O mesmo não se pode observar e tampouco comparar quando lidamos com as representações relacionadas ao comportamento dual do elétron. Nesse sentido, os textos sobre as três entidades físicas, por si só, não comunicam a intenção do autor. Para significá-los, há que se buscarem outras leituras nas diferentes produções. Depreende-se daí uma importante necessidade de se privilegiar estratégias de ensino que exijam a escrita como fator de comunicação de processos mais elaborados em contextos de aulas de química.

Estudos que abordam as três entidades em foco também foram realizados por Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009, p. 82) e mostram que os estudantes "[...] não conseguem reconhecer com clareza quais sãos as situações em que o fenômeno é essencialmente corpuscular ou tipicamente ondulatório".

Destacamos do conjunto de elaborações dos estudantes aquelas que, quantitativamente, representam o menor e o maior extremo da produção textual para as diferentes entidades. Esses extremos quantitativos nos dão uma ideia clara da tipologia adotada pelos alunos, já identificada como descritiva. Os textos[17] foram transcritos conforme produzidos.

Fenda Simples: *Imaginei as seguintes trajetórias ilustradas na vista superior levando em conta que a arma tem mobilidade para cima e para baixo e que a fenda é estreita.* Fenda Dupla: *Imaginei as seguintes trajetórias que ilustrei na vista superior levando em consideração que a arma também tem mobilidade para baixo e para cima e que a fenda é estreita.*

Quadro 20 – Texto 9: partículas

[17] Os textos produzidos pelos alunos foram numerados em ordem crescente. Do conjunto de textos, foram escolhidos entre os mais completos e os menos completos e são identificado apenas por números, já que foram transcritos conforme produzidos.

Fenda Simples: *A justificativa para o experimento se deve,/ como a metralhadora possui livre rotação, se movendo para todos os lados, para cima e para baixo, o preenchimento será total,/ mas será um pouco mais deslocado para a esquerda, pois a metralhadora está alinhada com o centro da parede. Ao virarmos ela, para disparar os projéteis, vão passar pela fenda,/ mas eles estão numa trajetória retilínea. A mesma inclinação que a metralhadora faz com o centro da parede, a trajetória também faz/, por isso, os tiros estão deslocados para a esquerda.*
O eixo x do gráfico é como se fosse uma parede, o centro do gráfico seria o centro da parede./ Como é um gráfico de probabilidade, não podemos afirmar com 100% de certeza onde todos os projéteis estarão. A maior probabilidade está representada por x_0, que seria a distância da incidência dos projéteis até o centro.
Fenda Dupla: *O experimento pode ser justificado como no primeiro caso, mas agora possui duas fendas, os projéteis passaram pelas duas, como elas estão separadas à mesma distância do centro, os projéteis estarão nas duas extremidades, e se distribuem.*
O gráfico apresenta duas probabilidades.

Quadro 21 – Texto 15: partículas

Os textos 9 e 15, sobre partículas, ilustram os extremos (maior e menor texto) encontrados no conjunto das produções. Cabe destacar que o estilo predominante é o de frases curtas, rupturas de ideias, desconexões, explicações insuficientes, falta de elementos epistemológicos e até mesmo de conhecimentos básicos que expliquem o fenômeno.

No texto 15, no ponto indicado pela primeira barra, o aluno interrompe o enunciado antes mesmo de formular plenamente a informação. Mesmo se tratando de uma interrupção brusca, não afeta o desenvolvimento contínuo e natural da ideia que explica o fenômeno estudado. No entanto, outros conhecimentos da mecânica clássica, fundamentais nessa atividade e já estudados nas aulas de Física, não aparecem nos textos.

Fenda Simples*: No meio a probabilidade é máxima porque a onda passa sem sofrer desvios, ou com pequenos desvios, ao lado direito e esquerdo temos também uma detecção, mas com intensidade diferente.*
Fenda Dupla: *A idéia é igual a uma fenda considerando os desvios da onda nas fendas*.

Quadro 22 – Texto 19: ondas

Fenda Simples: *As ondas feitas pelo objeto podem chegar a qualquer lugar da parede se tiver intensidade apropriada. No gráfico o eixo y representa a intensidade e o eixo do x o lugar da parede receptora. O gráfico mostra que frente à fenda há maior intensidade do que os outros pontos (levando em conta que o objeto caiu alinhado com a fenda), e essa intensidade vai diminuindo, quanto mais distante do local onde tem maior intensidade.*
Se levarmos em conta que as ondas batem na parede e voltam irão poder mudar porque de alguma forma pode ocorrer interferência.
Fenda Dupla: *Agora ocorre interferência entre duas ondas sendo esta construtiva, se as ondas estiverem à mesma distância da parede, nela temos em x=0, o lugar de maior intensidade.*

Quadro 23 – Texto 30: ondas

Fenda Simples: *Imagino que o feixe de elétrons se comporte de tal forma a incidir apenas na abertura da fenda, observando um comportamento ondulatório e não de partícula, como no caso das balas da metralhadora.*
Fenda Dupla: Nenhuma observação.

Quadro 24 – Texto 34: elétrons

Fenda Simples: *A questão da dualidade onda-partícula está incluso nesse sistema como se trata de emissão de elétrons, mas levando em conta a massa do elétron, a trajetória que esse elétron percorrerá até chegar ao detector de elétrons – elétrons, no entanto implicará certo momento que o elétron estará se comportando como onda. Assim sendo, a posição do elétron no detector de elétron será afetada devido a fenda, a trajetória e também a força gravitacional também um fator predominante para a posição no detector de elétrons.*
Fenda Dupla: *Levando em consideração as duas fendas, influenciará em uma melhor distribuição da posição dos elétrons, no entanto o que será levado em conta será a questão do comportamento da onda do elétron o que propiciará ondas construtivas e destrutivas, assim sendo o gráfico de representação será distribuído em sua probabilidade.*

Quadro 25 – Texto 39: elétrons

Encontramos, na maioria dos textos, um conjunto de frases muitas vezes soltas e justapostas, as quais não deixam entrever seus limites nítidos e conexões, cujos tópicos não configuram unidades de sentidos. Os parágrafos são compostos por uma mistura de frases que se associam, tentando uma interdependência, mas seguem sem a pontuação adequada. Um discurso escrito com características própria da fala.

O que se pode notar também é que, dos 19 alunos participantes da atividade, apenas um demonstrou preocupação com o comportamento do elétron, como se verifica no texto 48.

Considerei o elétron como partícula, eles preenchem a esquerda da parede com uma maior intensidade como podemos verificar no gráfico. O elétron saindo possui uma trajetória definida.

Considerei o elétron como partícula, por isso assume comportamento como se fosse um projétil. Considerei um elétron por vez. Mas ficou algumas dúvidas: Elétron é partícula ou onda? Como ele se comporta? Como fazer a junção dos gráficos? Ele bate na parede e muda a direção? Pode considerar como um feixe de elétrons? Os elétrons presos na parede geram alguma influência? Podemos considerar a massa?

Quadro 26 – Texto 48: fenda simples e dupla

Embora o aluno tenha tentado simplificar a solução ao tomar o elétron como partícula, suas dúvidas denotam a estranheza que tal opção causa diante das possibilidades que o experimento permite. Trata-se, então, de um excelente recurso didático, que, nesse caso, poderia esclarecer tal impossibilidade e remeter à noção de que, não havendo modelo analógico, resta, como único modelo possível para representar o comportamento do elétron, o modelo matemático.

A produção textual, como já referida, foi livre, com o intuito único de que todos os alunos pudessem escolher a sua maneira de potencializar a escrita na utilização dos conceitos inerentes ao fenômeno. Julgamos que, frente a essa liberdade, o aluno pudesse, de

acordo com seu estilo, transferir seus conhecimentos em unidades que teriam, além dos padrões da linguagem escrita, o seu estilo próprio. Esta forma de solicitar a atividade, todavia, pode não ser a mais eficiente.

Os diferentes momentos da atividade com elétrons nos fizeram refletir sobre o que asseverou Heisenberg (1987, p. 132) quanto à linguagem. “Observemos que é sempre difícil encontrarmos critérios fidedignos que indiquem quais, e de que maneira, termos lingüísticos devam ser empregados”. Afirma o autor que, na teoria quântica, no que diz respeito à utilização da linguagem, não se tem nenhum critério simples para se correlacionar a linguagem matemática aos conceitos da linguagem cotidiana. Por fim, acrescenta o autor, “mesmo no limite de grandes dimensões, a correlação – entre símbolos matemáticos, medidas experimentais e conceitos ordinários – está longe de ser trivial” (HEISENBERG, 1987, p. 134).

8 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE

A compilação de dados dos questionários revela:

1. A primeira questão versou sobre as dificuldades encontradas no desenvolvimento da atividade. Dos dezenove alunos, a maioria (onze) considerou fácil e apenas três deles entendem que há certa dificuldade. No entanto, se cruzarmos esse dado com a produção de cada momento, a atividade encerra certa dificuldade que o aluno nem percebe.

2. O texto de Feynman foi considerado, pela maioria, de fácil compreensão, porque promove o diálogo, suscita a discussão, detalha o experimento em todas suas etapas, apresenta-se com uma linguagem bastante acessível e interessante. Por fim, os estudantes avaliaram, como positivo, o texto no final das atividades de cada sistema. Dois estudantes apenas observaram aspectos negativos relacionados aos textos, são eles: texto longo, excesso de informação, muitos detalhes, que exigiam muita atenção e geravam dúvidas.

3. Quanto ao uso dos textos para compreensão do fenômeno quântico: 50% dos estudantes consideraram que os textos pouco ajudaram apesar de facilitarem a compreensão do fenômeno quântico envolvido no experimento da dupla fenda com projeção de elétrons. Quaro estudantes avaliaram que os textos não contribuíram nessa atividade. No que tange à justificativa de resposta do aluno, contraditoriamente, os comentários, de maneira geral, reforçam uma imagem positiva dos textos enquanto recurso facilitador da compreensão do fenômeno quântico. Evidentemente, os comentários podem ser destacados alguns negativos, e outros com restrições.

4. Foi confirmado pela totalidade dos estudantes que o uso das animações (*softwares*) contribuiu para uma melhora na compreensão do comportamento das entidades físicas estudadas (projéteis, ondas e elétrons). Eles alegaram que o recurso visual utilizado foi de fundamental importância na compreensão do comportamento das entidades físicas estudadas.

5. A atividade que despertou maior interesse dos estudantes foi a dos elétrons, seguida da atividade com ondas. Certamente aqui, as variáveis que interferem no processo foram importantes para o interesse dos estudantes. De maneira geral, os estudantes consideraram a atividade com elétrons como a mais complexa, desconhecida, incerta, portanto, a mais envolvente. Outra atividade que despertou muito interesse, porém em menor escala, foi a das ondas, por terem alguma afinidade com fatos do cotidiano.

6. A atividade que gerou menos interesse foi a dos projéteis. Pode-se depreender das falas dos estudantes que os motivos vão desde o fato de ser uma atividade trivial, já conhecida por boa parcela desses estudantes, até a facilidade encontrada para representação gráfica.

7. A aceitação foi unânime da sequência dos conteúdos e abordagem metodológica. Dentre os motivos, introdução gradativa da complexidade, além de considerar os conhecimentos já adquiridos. A única ressalva diz respeito ao lugar do texto na atividade, antes da animação e não como no final da atividade. Com relação a esse fato, avaliamos as duas propostas e o texto no final parece ser mais apropriado, sobretudo, porque o aluno pode comparar os gráficos propostos por Feynman.

8. Com relação ao conteúdo proposto, também foi considerado interessante pela totalidade dos alunos. Eles fizeram os seguintes comentários: aguça a curiosidade e consiste em um dos pilares da problemática da quântica; faz compreender de uma maneira geral a importância da quântica. Outras observações de natureza metodológica apareceram como justificativa de aprovação da atividade, dentre elas, a forma dialógica adotada pelo professor; as dificuldades postas gradualmente, minimizando o impacto de algo impossível de se aprender.

9. Embora a aceitação e aprovação da proposta apresentada tenha sido total, a maioria sentiu-se perdida, pelas seguintes razões: falta de conhecimentos específicos, por exemplo, físicos sobre o assunto; insegurança quanto à questão da avaliação apareceu fortemente na elaboração gráfica, visto que representava uma síntese do problema estudado.

10. Nessa questão, as opiniões são divergentes entre possibilidade e não-possibilidade de descrever o comportamento real do elétron. Os adeptos da impossibilidade atribuem ao observável, já que o elétron apresenta comportamento dual. É interessante notar que a grande maioria considera impossível desvendar os mistérios da natureza, pela sua complexidade, pelo fato de interferirmos nela, até mesmo por não conhecermos o comportamento real do elétron. Há aqueles que consideram possíveis, contudo as perspectivas se apresentam muito distantes dessa natureza imediata, com a qual estamos conectados. Todos concordam que a ciência não é verdade pronta, acabada e encontra-se em continua transformação. Embora a maioria dos estudantes considerasse o elétron partícula/onda, a atividade contribuiu muito para melhorar a compreensão do fenômeno. Além do interesse e o entendimento mais significativo do comportamento do elétron. Os estudantes que consideravam o elétron com partícula, alegam que a atividade possibilitou uma nova forma de pensar o fenômeno, ou o entendimento dos conceitos que envolvem o fenômeno da dualidade.

11. Os recursos utilizados foram validados por todos os estudantes. As poucas ressalvas apontadas dizem respeito à necessidade de se destinar maior tempo de desenvolvimento (especialmente ao dos elétrons). A atividade referente à animação foi muito bem aceita pelos participantes, que alegaram que a visualização contribuiu efetivamente para a compreensão dos experimentos discutidos.

12. Nessa questão, em que os estudantes poderiam indicar atividades que julgassem desnecessárias para tratar a temática, também se mostrou consensual. Todos, com exceção de dois estudantes, consideraram o conjunto de atividades de fundamental importância. Um deles considerou desnecessário o trabalho com gráficos, mas não justificou. O outro sugeriu que a atividade que o aluno expõe suas ideias sobre o fenômeno poderia ser descartada, porque na tentativa de explicar o aluno acaba se perdendo.

13. Os estudantes alegaram que se trata de uma forma incomum de estratégia de aulas em um curso e deixaram claro que a atividade proporcionou maior compreensão dos fatos; mais detalhes para reflexão; maior tempo para reflexão; possibilidade de discussão, entre outros. Evidentemente, os dados analisados mostram que as atividades instigaram os alunos a imaginar e vislumbrar o mundo microscópico de objetos quânticos. Contudo há necessidade de outras pesquisas que discutam atividades desencadeadoras do processo da imaginação no campo da Teoria Quântica. Ensinar implica “correr risco”, portanto, cabe-nos agora prosseguir na busca de procedimentos didáticos que deem conta de um ensino efetivamente significativo.

Pelo que podemos depreender dessa avaliação, tais procedimentos são mais interessantes e produtivos do que ensinar os conceitos em frases isoladas. Os alunos puderam avaliar os diferentes efeitos de sentidos, pelos diferentes modos de refletir sobre o fenômeno e propor solução. Dessa forma, o processo de construção do conhecimento se dá com base em diferentes momentos e os erros devem ser entendidos como indícios de hipóteses que o aluno formulou.

9 CONCLUSÃO

Ao retomar as questões que nortearam o objeto de estudo – Como ensinar os conhecimentos abstratos de maneira que os alunos possam explicar e significar os fenômenos e transpô-los para situações do cotidiano? Como promover situações de ensino que alimentem o diálogo e o questionamento sobre os conhecimentos científicos? Como motivar os alunos a enfrentarem os acertos e os erros como crescimento acadêmico? Que competências seriam necessárias ao professor de química quântica para lidar com novas abordagens metodológicas em suas aulas? Qual seria a resposta dos alunos frente a novas abordagens alternativas? –,é importante lembrar que entendemos ser imprescindível tornar o mundo mais inteligível se quisermos romper com sistemas e práticas educativas que apresentam o conhecimento pronto, que, de certa maneira, nos dá o mundo interpretado. Imbuídos desta convicção, a pesquisa foi levada a efeito.

No que se refere, especificamente, às ações e práticas pedagógicas, cabe lembrar que tais questões foram importantes na definição e planejamento da sequência didática, sobretudo para focalizarmos respostas inusitadas, intervalos e deslizes de sentidos e buscarmos explicações plausíveis para a comunicação de conhecimentos científicos no contexto escolar. É fundamental também pensarmos os conhecimentos de Mecânica Quântica, de maneira geral, com relação a como trabalhar em sala de aula. Por mais consensual e implícita que seja a noção da dificuldade de se interpretar o mundo microscópico, o problema crucial parece estar ligado à transposição didática que carece de abordagens que fomentem a circulação de conhecimentos, informações e aplicação desses conhecimentos em situação de ensino e de leitura de mundo.

A inclusão de conteúdos da Mecânica Quântica no ensino médio foi objeto de vários estudos, apontando inclusive alternativas bem interessantes acerca de sua implementação. Já no ensino superior, poucos trabalhos de pesquisa se destinaram a essa reflexão. Dessa forma, o professor ainda é o detentor do discurso legítimo, oficial e correto, aquele que está no livro. Partindo desse pressuposto, planejamos a sequência didática pautada em experimentos mentais, porque, de certa maneira, eles possibilitam rever as ações pedagógicas numa perspectiva mais crítica. Nesse sentido, concordamos que é preciso buscar mecanismos de ver, de ler o silêncio, acolher o aluno, para entender a apatia, a desistência e até mesmo a rebeldia, ou, ainda, inverter nosso olhar de professor, considerando que os alunos

também nos interpelam. No que se refere especificamente ao professor, cabe a ele buscar estratégias de ensino, incorporar experiências às de seus alunos.

Não se pode mais admitir que a repetição exaustiva de fórmulas em exercícios propostos nos livros didáticos promova uma leitura significativa do mundo. Nem se deve imaginar também que exercícios dessa natureza não tenham nenhum valor ou que não devam ser trabalhados no curso superior. Eles são importantes como uma modalidade didática, contudo, na perspectiva de única ação ou pelo menos como ação predominante, eles são cansativos e enfadonhos, sem significado para os alunos. Daí a necessidade de se propor textos e outras atividades que possam romper com o padrão de aula consagrado nas universidades, a transmissão.

Ao invés disso, fazer uso da imaginação por meio de problematização bem planejada pelo professor pode contribuir para as conexões necessárias entre as ideias dos alunos e os conhecimentos científicos historicamente constituídos e acumulados. Evidentemente, que essa forma de ensinar exige do professor outro tipo de diálogo com os conhecimentos e a ênfase sai do campo da transmissão e cobrança de conteúdos curriculares e passa para um processo de discussão, de questionamento, de sistematizações, no qual o erro não é mais visto como ausência de conhecimento, mas indício do processo de construção cognitiva. É fundamental nesse processo que o professor adepto do movimento dialógico, que é gerido por ele, possa iniciar novas formulações frente a formulações do aluno e o erro passa a ser uma oportunidade privilegiada de elaboração, reelaboração e também de desconstrução. Esse processo dialógico possibilita intersecção de vozes, e isso é particularmente significativo, visto que o aluno não escolhe o que dizer num contexto de aula, suas atitudes, seus posicionamentos são desenhados por outras falas, dessa forma pode-se afirmar que o discurso não é neutro, mas fruto de um trabalho sobre outros discursos.

A forma que tratamos os conhecimentos científicos, visando um aprofundamento conceitual meio às formulações matemáticas, parece que melhora o processo de compreensão do fenômeno e sua aplicação a novas situações e novos contextos. Na proposição da sequência didática desta pesquisa, as diversas ações das quais os alunos participaram e procuraram formas de responder aos questionamentos do professor evidenciam vários gestos de interpretação que se mostraram mais significativos por terem sido construídos numa perspectiva coletiva. Dessa forma, não só o professor, mas também os alunos são produtores e articuladores de discursos. Em termos metodológicos, a concepção dialógica contempla, em maior ou menor grau, os gestos de interpretação postos no processo de ensino.

Estamos olhando a atividade em seus aspectos globais, ancorados na etnometodologia, resultando em um conjunto de atividades que se conecta na busca da solução

para o problema do Experimento da Dupla Fenda. Assumimos também como válidos aspectos específicos dessa proposta. Assim sendo, o trabalho com representações analógicas e gráficas possibilitaram o resgate de conceitos da física clássica e da formalização matemática e, sobretudo, mostraram-se estratégias bastante interessantes para gerir questionamentos. Além disso, é de fácil manipulação e visualização, podendo ser utilizada sob diversas formas, de maneira a compartilhar os conhecimentos em grupos e para a sala de aula como um todo.

Assumimos ainda como válido o momento de discussão. Mas é importante destacar que os resultados mostraram a enorme dificuldade dos alunos em responder às solicitações do professor com vistas a fomentar o diálogo, cercar os conhecimentos e provocar o alargamento da sua capacidade interpretativa. Nesse sentido, a contribuição da Análise do Discurso, na etapa do trabalho empírico, é a de considerar a escola como lugar da experiência, da autoria, que, segundo Orlandi (1998), é a passagem da função do sujeito enunciador para o sujeito autor.

Na perspectiva do discurso, é importante destacar a escola como o lugar de experimentar os sentidos, sendo assim, deve-se expor os sujeitos às situações de comunicar verbalmente conhecimentos científicos. O contexto das aulas de ciências se constitui numa realidade singular e complexa, em que se dá um conjunto de relações que favorecem o diálogo entre seus agentes e o conhecimento científico. Na teoria da interação verbal, defende Bakhtin (2000, p. 281), o dialogismo traduz o princípio de que o discurso é necessariamente dirigido a outro, enquanto a polifonia expressa outros discursos naquele que está sendo engendrado. Os interlocutores situam-se num espaço físico-temporal bem definido e "a palavra é determinada tanto pelo fato de que procede de alguém como pelo fato de que se dirige a alguém". Sobre os gêneros do discurso, Bakhtin (2000) procura estabelecer algumas diferenças essenciais e classifica-os em *gêneros primários* e *gêneros secundários*. Para ele, "os gêneros primários do discurso aparecem em circunstâncias do cotidiano, que se constituem em situações verbais mais espontâneas. Já os gêneros secundários aparecem em situações mais complexas e relativamente mais evoluídas, especialmente de escrita".

Para se tentar compreender, após o cotejamento da produção de textos não-verbais (representações analógicas e gráficas) e os escritos, percebemos que há uma grande distância entre essas específicas competências intelectuais. A capacidade de leitura das representações analógicas e as respostas dadas, bem como as suas respectivas representações em forma de gráficos denotam raciocínio lógico, coerente e assertivo, que podemos considerar um fator relevante quando enfocamos o aspecto positivo deste conteúdo. Provavelmente, isto decorre de metodologia que privilegia apenas parte da formação intelectual dos nossos estudantes, que

consiste na repetição de exercícios que visam apenas à reprodução do conhecimento científico. Contudo, mediante uma solicitação que exige outra capacidade intelectual, como a escrita, esses mesmos estudantes demonstraram grande dificuldade em expressar todos os procedimentos utilizados para as explicitações, sejam na representação analógica e gráfica.

As produções textuais revelam um baixo domínio da variedade formal da linguagem científica dos alunos. Isto é, seus textos, geralmente curtos, apresentam-se de forma fragmentada, sem progressão e/ou continuidade do pensamento para formarem uma unidade de sentido. Sabemos que o domínio de boa parte dos conceitos quânticos para entender o mundo microscópico se dá pela sofisticada linguagem matemática, daí fica clara a importância de se trabalhar a linguagem verbal e escrita. Entendemos que não se trata de um processo fácil, como a pesquisa revelou muito bem, as palavras se perdem diante da precisão que a matemática fornece. Daí que percebemos uma grande distância entre as específicas competências intelectuais no cotejamento dos textos não verbais e dos escritos dos sujeitos desta investigação.

Para acionar os constructos imaginários e a abstração em relação ao mundo quântico, talvez o mais relevante seja promover situações de ensino que alimentem o diálogo e as questões sobre o que ocorre no mundo microscópico. Na literatura brasileira, são poucas as sugestões metodológicas que envolvem abstrações, como as dos experimentos mentais.

Validamos ainda o recurso audiovisual, neste caso, um filme. Se bem selecionado, constitui-se um instrumento que cada vez mais ganha espaço e importância. São interessantes, sobretudo, por possibilitarem diferentes níveis de significado.

Ainda que, em relação à comunicação verbal e escrita, muitas lacunas importantes foram constatadas nesta pesquisa, estas não invalidam a proposição de tais atividades no ensino de Mecânica Quântica. Contudo, sabemos que tais procedimentos, para que efetivamente entrem nas salas de aula, precisam ser elaborados, reelaborados, num processo de ação/ reflexão e avaliados enquanto ação pedagógica.

Mesmo se tratando de uma pesquisa pontual, seus dados mostram uma aprovação significativa por parte dos sujeitos participantes. Isso pode ser evidenciado nos questionários de avaliação e no interesse e participação nas atividades.

Esta pesquisa nos dá suporte para inferirmos em termos de abordagem metodológica. Embora os resultados constituem-se pistas com relação aos procedimentos adotados pelos professores, é importante que haja outras pesquisas que articulem experimentos mentais em termos de conhecimento específicos se quisermos um diálogo mais eficiente com a realidade quântica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. J. P. M. *Discursos da ciência e da escola*: ideologias e leituras possíveis. Campinas: Mercado de Letras, 2004.

_____. Análise do discurso numa perspectiva transversal. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO, 4., 2005, Aveiro. *Anais...* Aveiro: SOPCOM, 2005. p. 2001-2005.

_____. O texto escrito na educação em física: enfoque na divulgação científica. In: ALMEIDA, M. J. P. M.; SILVA, H. C. (Orgs.). *Linguagens, leituras e ensino de ciências*. Campinas: Mercado de Letras: Associação de Leitura do Brasil, 1998. p. 53-68.

ALVES-MAZZOTTI, A. J.; GEWANDSZNAJDER, F. *O método nas ciências naturais e sociais*: pesquisa quantitativa e qualitativa. São Paulo: Pioneira, 1998.

ANDRADE, I. B.; MARTINS, I. Discurso de professores de ciências sobre a leitura. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 121-151, 2006.

BACHELARD, G. *A formação do espírito científico.* Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BACON, F. *Novum organum*. Trad. de José Aluysio Reis de Andrade, São Paulo: Abril Cultural, 1999. (Os Pensadores).

_____. *Novum organum ou verdadeiras indicações acerca da interpretação da natureza*. Trad. de José Aluysio Reis de Andrade. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <http://br.egroups.com/group/acropolis/>. Acesso em: 20 jan. 2009.

BAKHTIN, M. *Estética da criação verbal.* 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

_____. *Estética da criação verbal.* São Paulo: Martins Fontes, 2000.

BAUER, M. W.; GASKELL, G. *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som*: um manual prático. Trad. Pedrinho A. Guareschi. 6. ed. Petrópolis: Vozes, 2007.

BOHR, N. *Atomic physics and human knowledge*. Nova Iorque: Wiley, 1958.

BORGES, A. T. O estudo de modelos mentais. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 207-226, 1997.

BRENDEL, E. Pompas de intuición y el uso adequado de los experimentos mentales. *Ideias y Valores*, Bogotá, n. 123, p. 3-22, dez. 2003.

BROCKINGTON, G. *A realidade escondida: a dualidade onda-partículas para estudantes do ensino médio.* 2005. 268f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BRONOWSKI, J. *As origens do conhecimento e da imaginação*. Brasília, DF: Ed.UnB, 1997.

BROWN, J. R. *The laboratory of the mind*: thought experiments in the Natural Sciences. London: Routledge, 1991a.

_____. Thought experiments: a platonic account. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. (Eds.). *Thought experiments in science and philosophy*. London: Routledge, 1991b. p. 119-128.

_____. Why empiricism won't work. In: HULL, D.; FORBES, M.; OKRUHLIK, K. (Orgs.). *PSA 1992.* East Lansing: Philosophy of Science Association, 1993. v. 2, p. 271-279.

CAMPBELL, D. T.; FISKE, D. W. Convergent and discriminant validation by the multitrait-multimethod matrix. *Psychological Bulletin*, v. 56, n. 2, p. 81-105, 1959.

CARDOSO, S. H. B. *Discurso e ensino.* Belo Horizonte: Autêntica, 1999.

CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JR., O.; ROCHA, J. F. M. Revelando o caráter determinístico da Mecânica Newtoniana: uma ponte para o ensino da Física Moderna no Ensino Médio. *Ideação*, Feira de Santana, n. 3, p. 51-68, jan./jun. 1999.

CERTEAU, M. de. *L'invention du quotidien.* Paris: UGE, 1980.

CHIBENI, S. S. *Aspectos da descrição física da realidade*. Campinas: CLE/Unicamp, 1997.

COHEN, L.; MANION, I. *Research methodos in education*. London: Croom Helm, 1980.

COHEN, E; FRANCO, R. *Avaliação de projetos sociais.* Petrópolis: Vozes, 1993.

COOPER, R. Thought Experiments. *Metaphilosophy*, New Haven, v. 36, n. 3, p.328-347, abr. 2005.

COULON, Alan. *Etnometodologia*. Trad. Ephraim Ferreira Alves. Petrópolis: Vozes, 1995a.

_____. *Etnometodologia e educação.* Trad. Guilherme João de Freitas Teixeira. Petrópolis: Vozes, 1995b.

CRAICK, K. *The nature on explanation.* Cambridge: Cambridge University Press, 1943.

CREASE, R. The most beautiful experiment. Disponível em: <http://physics world.com/cws/article/print/9746>. Acesso em: 20 jun. 2006.

DE LONGHI, A. L. El discurso del professor y del alumno: análisis didáctico en clases de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 2, n. 18, p. 201-216, 2000.

DENZIN, N. K. *Interpretive interactionism*. Newbury Park: Sage, 1989.

DESCARTES, R. *Discours de la méthode*. In: ADAM, Ch.; TANNERY, P. (Orgs.). *Oeuvres de Descartes*. Paris: Vrin, 1996. v. 6, p. 1-78.

DESLANDES, S. F. A construção do projeto de pesquisa. In: MINAYO, M. C. S. (Org.). *Pesquisa social*: teoria, método e criatividade. Petrópolis: Vozes, 1994. p. 57-67.

DUARTE, R. Pesquisa qualitativa: reflexões sobre o trabalho de campo. *Cadernos de Pesquisa*, São Paulo, n. 115, p. 139-154, 2002.

EDWARDS, D.; POTTER, J. *Discursive psychology.* London: Sage, 1992.

EINSTEIN, A. *As notas autobiográficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

_____. *Como vejo o mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

_____. *Elementare überlegungen zur interpretation der grundlagen der quanten-mechanik*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1953.

_____. Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment. *British Journal for the Philosophy of Science*, Oxford, v. 49, n. 3, p. 397-424, 1998.

EINSTEIN, A., PODOLSKI, B.; ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, Princeton, n. 47, p. 777-780, 1935.

FAGUNDES, M. B. *Ensinando a dualidade onda-partícula sob uma nova óptica.* 1997. 148f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FEYNMAN, R. P.; LEIGTON, R. B.; SANDS, M. *Lectures on physics*. Califórnia: Addson Wesley, 1964.

FLICK, U. *Uma introdução à pesquisa qualitativa*. Trad. Sandra Netz. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

GALAGOVSKI, L. R.; BONÁN, L.; ADÚRIZ BRAVO, A. Problemas con el lenguaje científico en la escuela. Una analisis desde la observación de clases de ciencias naturales. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 16, n. 2, p. 315-321, 1998.

GALAGOVSKY, L. R.; ADÚRIZ-BRAVO, A. Modelos y analogías en la enseñanza de lãs ciencias naturales: el concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 19, n. 2, p. 231-242, 2001.

GALAGOVSKI, L. R.; MUÑOZ, J. C. La distancia entre aprender palabras y aprehender conceptos: o entramado de palabras-concepto (EPC) como un nuevo instrumento para la investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 20, n. 1, p. 29-45, 2002.

GALAKOVSKI, L. R. et al. Representaciones mentales, lenguajes y códigos en la enseñanza de ciencias naturales: un ejemplo para el aprendizaje del concepto de reacción química a partir del concepto de mezcla. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 1, n. 21, p. 107-121, 2003.

GALILEI, G. *Discorsi e dimonstrazioni sopra due nuove scienze attenenti Alla mecanica & movimenti locali*. Elseviriti: Leida, 1638.

_____. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano*. Trad., introd. e notas de Pablo Rubén Mariconda. 2. ed. São Paulo: Discurso, 2004.

_____. *Duas novas ciências.* Trad. e notas Letizio Mariconda e Pablo Rubén Mariconda. 2. ed. São Paulo: Nova Stella, 1988.

GARFINCKEL, H. *Studies in ethnometodology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1967.

GENDLER, T. S. Galileo and the indispensability of scientific thought experiment. *British Journal for the Philosophy of Science,* Oxford, v. 49, n. 3, p. 397-424, 1998.

_____. Thought experiments. In: NADEL, L. (Org.). *Encyclopedy of cognitive science.* London: Nature Publishing Group, 2003. v. 4, p. 388-394.

_____. *Thought experiment*: on the powers and limits of imaginary cases. New York: Garland Publishing, 2000.

_____. Tools of the trade: thought experiments examined. *The Harvard Review of Philosophy*, Spring, v. 4, p. 81-85, 1994.

GENTENER, D.; STEVENS, A. L. *Mentals models*. Hillsdale: Lawrence Erlbaun, 1983.

GRECA, I.; MOREIRA, M. A. Além da detecção de modelos mentais dos estudantes: uma proposta representacional integradora. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 31-53, 2002.

_____. Uma revisão da Literatura sobre estudos relativos ao ensino de mecânica quântica introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 29-46, 2001.

_____. Un estudio piloto sobre representaciones mentales, imágenes, proposiciones y modelos mentales respecto al concepto de campo electromagnético en alumnos de física general, studiantes de postgrado y físicos profesionales. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 95-108, 1996.

GRECA, I. M.; SANTOS, F. M. T. Dificultades da generalização das estratégias de modelação em ciências: o caso da física e da química. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 31-46, 2005.

GURGEL, I. *A imaginação científica como componente do entendimento*: subsídios para o ensino de Física. 2006. 139f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências)–Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GUESSER, A. H. A etnometodologia e a análise da conversação e da fala. *Em Tese: Revista Eletrônica dos Pós-Graduandos em Sociologia Política da UFSC*, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 149-168, ago./dez. 2003.

HAMPSON, P. J.; MORRIS, P. E. *Understanding cognition*. Cambridge: Blackwell Publishers, 1996.

HARRE, R. *The discursive mind.* London: Sage, 1994.

_____. *The singular self*. London: Sage, 1998.

HEISENBERG, W. *Física e filosofia.* Trad. Jorge Leal Ferreira. 2. ed. Brasília, DF: Ed. UnB, 1987.

HELM, H.; GILBERT, J. Thought experiments and physics education – part 1. *Physics Education*, Bristol, v. 20, p. 124-131, 1985.

HELM, H.; GILBERT, J.; WATTS, M. Thought experiments and physics education – part 2. *Physics Education*, Bristol, v. 20, p. 211-217, 1985.

HOLTON, G. *A imaginação científica*. Rio de Janeiro: Zahar, 1979.

HUYGENS, C. Tratado sobre a luz. Trad. Roberto de Andrade Martins. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas, suplemento 4, p. 1-99, 1986.

JOHNSON-LAIRD, P. N. *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

_____. The mental representation of the meaning of words. *Cognition*, Heslington, v. 25, n. 1-2, p. 189-211, 1987.

_____. Mental models. In: POSNER, M. (Ed.) *Foundations of cognitive science.* Cambridge: MIT, 1990. p. 469-499.

JONES, D. G. C. Teaching modern physics micro-conception of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, Bristol, v. 26, n. 2, p. 93-98, mar. 1991.

KRAPAS, S.; ALVES, F.; CAVALHO, L. R. de. Modelos mentais e a Lei de Gauss. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 7-21, 2000.

KUHN, T. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1992.

_____. *The essential tension*. Chicago: Chicago Univertsity Press, 1977.

_____. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: Chicago Univertsity Press, 1970.

LAGRECA, M. C. B. *Tipos de representações mentais utilizadas por estudantes de Física Geral*: a área de Mecânica Clássica e possíveis modelos mentais nessa área. 1997. 122f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

LATTERY, M. J. Thought experiments in physics education: a simple and practical example. *Science & Education*, Netherlands, v. 10, n. 5, p. 485-492, 2001.

LEFF, H. S.; REX, A. F. *Maxwell's demon*: entropy, information, computing. Bristol: Adam Hilger and Princeton University Press, 1990.

LOBATO, T.; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 1, p. 119-132, 2005.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. *Pesquisa em educação*: abordagens qualitativas. São Paulo: EPU, 1986.

MACH, E. On thought experiment. In: _____. *Knowledge and error*: sketches on the psychology of enquiry. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1905. p. 134-147.

_____. *Knowledge and error*: Sketches on the psychology of enquiry. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1926. p. 134-147.

MACH, E. *The Science of Mechanics*: a critical and historical account of its development. London: The Open Court Publishing, 1942.

MAINGUENEAU, D. *Gênese dos discursos*. Trad. Sirio Possenti. Curitiba: Criar, 2005.

_____. *Elementos de lingüística para o texto literário*. São Paulo: Martins Fontes, 1996.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 6. ed. 4. reimp. São Paulo: Atlas, 2007.

MARCUSCHI, L. A. Aspectos da questão metodológica na análise da interação verbal: o continuum qualitativo-quantitativo. *Revista Latinoamericana de Estudos do Discurso*, Caracas, v. 1, n. 1, p. 23-42, ago. 2001.

MATTHEWS, M. R. *Science teaching*: the role of history and philosophy of science. New York: Routledge, 1994.

_____. Ernst Mach and contemporary science education reforms. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.). *History, philosophy and science teaching*: selected readings. New York: Teachers Colege Press, 1991. p. 9-18.

McALLISTER, J. W. The evidential of thought experiment in science. *Studies in History and Philosophy of Science*, Leiden-Netherland, v. 27, n. 2, p. 233-250, 1996.

MENEZES, L. C. de. *A matéria uma aventura do espírito*: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MILL, J. S. *Sistema de lógica dedutiva e indutiva*. São Paulo: Abril Cultural, 1979. (Os Pensadores).

MINAYO, M. C. S. (Org.). *Pesquisa social: teoria, método e criatividade*. Petrópolis: Vozes, 1994.

MOLLON, J. D. The origins of the concept of interference. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 360, n. 1794, p. 807-819, maio 2002. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/3066507>. Acesso em: 15 abr. 2007.

MONTENEGRO, L. R. Interpretações da Mecânica Quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. 2000. 136f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências)–Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MONTENEGRO, L. R.; PESSOA JÚNIOR, O. Interpretações da Teoria Quântica e as concepções dos alunos de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.

MORA, J. F. *Dicionário de Filosofia*. Trad. Roberto Leal Ferreira e Alvaro Cabral. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

MOREIRA, M. A. Modelos mentais. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 3, p. 1-39, 1997.

MOREIRA, M. A.; LAGRECA, M. do C. B. Representações mentais dos alunos em Mecânica Clássica: três casos. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 83-106, 1998.

MORTIMER, E.; SCOTT, P. Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sócio-cultural para analisar e planejar o ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 1-24, 2002.

MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching Quantum Mechanics on a introductory level. *American Journal of Physics*, New York, v. 70, n. 3, p. 200-209, mar. 2002

_____. *Interferômetro de Mach-Zehnder, simulador*. Disponível em: <http//www.physics.unimuenchen.de/didaktik/computer/interferehtml>. Acesso em: 2 jul. 2008.

NERSESSIAN, N. Razonamiento basado em modelos y cambio conceptual. *Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias,* Cádiz, v. 4, n. 3, p. 563-570, 2007.

NEWTON, I. *Principia*: princípios matemáticos de filosofia natural. São Paulo: Nova Stella, 1990.

NORTON, J. Thought experiments in Einstein's work. In: HOROWITZ, T.; MASSEY, G. J. *Thought experiments in Science and Philosophy*. Maryland: Rowman& Lttlefield Publishers, 1991. p. 129-148.

_____. Are thought experiments just what you thought? *Canadian Journal of Phylosophy*, Calgary, n. 3, v. 26, p. 333-366, 1996.

_____. Why thought experiments do not transcend empiricism. In: HITCHOCK, C. (Ed.). *Contempory debats in the Philosophy of Science*. Pittsburgh: Blackwell, 2004. p. 44-66.

NÚÑEZ, I. B.; NEVES, L. S.; RAMALHO, B. S. Uma reflexão em relação ao estudo da Mecânica Quântica: o princípio da incerteza. *Revista Iberoamericana de Educación*, 2002. Disponível em: <http://www.rieoei.org/deloslectores/Beltran.PDF>. Acesso em: 4 mar. 2009.

OLIVEIRA, B. J. de. *Francis Bacon e a fundamentação da ciência como tecnologia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.

ORLANDI, E. P. A leitura proposta e os leitores possíveis. In. ORLANDI, E. P. (Org.). *A leitura e os leitores*. Campinas: Pontes, 1998. p. 7-24.

_____. *A linguagem e seu funcionamento*: as formas do discurso. 4. ed. Campinas: Pontes, 1996a.

_____. *As formas de silêncio*: no movimento dos sentidos. 4. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1997.

_____. *Análise de discurso*: princípios e procedimentos. Campinas: Pontes, 1999.

_____. *Discurso e leitura*. São Paulo: Cortez; Campinas: Unicamp, 1996b.

_____. *Discurso e leitura*. São Paulo: Cortez; Campinas: Unicamp, 1993.

_____. *Discurso e texto*: formulação e circulação dos sentidos. Campinas: Pontes, 2001.

_____. *Interpretação*: autoria, leitura e efeitos do trabalho simbólico. 4. ed. Campinas: Pontes, 2004.

OSADA, J. *Evolução das idéias da física*. São Paulo: Edgard Blücher e Edusp, 1972.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

_____. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 2, p. 135-151, 2001.

PATY, M. *A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da física contemporânea*. Trad. Mary Amazonas Leite de Barros. São Paulo: Edusp, 1995.

PÊCHEUX, M. *O discurso*: estrutura ou acontecimento. 4. ed. Trad. Eni Puccinelli Orlandi. Campinas, SP: Pontes, 2006.

_____. Análise automática do discurso. In: GADET, F.; HAK, T. (Orgs.). *Por uma análise automática do discurso*: uma introdução à obra de Michel Pêcheux. 3. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1997. p. 61-151.

_____. *Language sementics and ideology*. Campinas: Editora da Unicamp, 1988. (Trad. Brasileira: Semântica e Discurso).

PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMAN, F. Concepções relativas à dualidade partícula-onda: uma investigação na formação de professores de física. *Revista Eletrócnica de Enseñanza de las Ciencias*, Ourense, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

PEREZ, J. R. B.; CALUZI, J. J. A divulgação científica e o ensino de Física Moderna. In: ARAÚJO, E. S. N. N. de; CALUZI, J. J.; CALDEIRA, A. M. A. (Orgs.). *Divulgação científica e ensino de Ciências*: estudos e experiências. São Paulo: Escrituras, 2006. p. 57-89

PÉREZ-GOMES. A. I. Compreender o ensino na escola: modelos metodológicos de investigação educativa. In: GIMENO SACRISTÁN, J.; PERÉZ-GÓMES, A. I. *Compreender e transformar o ensino*. 4. ed. Porto Alegre: Artimed, 1998. p. 99-117.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003. v. 1.

_____. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. v. 2.

PETRI, J.; NIEDDERER, H. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, London, v. 20, n. 9, p. 1075- 1088, nov. 1998.

PIETROCOLA, M. Curiosidade e imaginação: os caminhos do conhecimento na ciências, nas artes e no ensino. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.). *Ensino de Ciências*: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Thomson, 2004. p.119-133.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o Ensino Médio? *Caderno Catarinense de Física*, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

POPPER, K. *On the use and misuse of imaginary experiments, especially in Quantum Theory*: in the logic of scientific discovery. 4. ed. London: Hutchinson, 1968.

REINER, M.; BURKO, L. M. On the limitations of thought experiments in Physics and the eonsequences for Physics Education. *Science & Education*, Netherlands, v. 12, p. 365-385, 2003.

ROBILOTA, M. O cinza, o preto e o branco: da relevância da História da Ciência no Ensino de Física. *Cadernos Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 5, n. especial, p. 7-22, 1988.

RÖEMER, O. *Magnetic Waves*. Disponível em: <http://www.worldscibooks.com/phy_etextbook/p207/p207_chap1_2.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2006.

ROUSE, W. B.; MORRIS, N. M. On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models. *Psychological Bulletin*, v. 100, n. 3, p. 349-363, 1986.

SANMARTÍ, N.; IZQUIERDO, M.; GARCIA, P. Hablar e ecribir: una condición necesaria para aprender ciencias. *Cuadernos de Pedagogía*, Barcelona, n. 281, p. 54-58, 1999.

SANTOS, B. de S. *Um discurso sobre as ciências*. 8. ed. Porto: Afrontamento, 1996. (Coleção: História e Idéias).

_____. *Introdução a uma ciência pós-moderna*. 3. ed. Rio de Janeiro: Graal, 2000.

SARDÀ JORGE, A.; SANMARTÍ, N. Enseñar a argumentar cientificamente: um reto de las clases de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 18, n. 3, p. 405-422, 2000.

_____. Cómo promover distintos niveles de lectures de los textos de ciências. *Revista Eletrocnica de Enseñanza de las Ciencias*, Ourense, v. 4, n. 2, p. 290-303, 2006.

SCHWARTZ, D. L.; HOLTON, D. L. Tool use and the effect of action on the imaginations. *Journal of Experimental Psychology*, Washington, DC, v. 2, n. 6, p.1655-1665, 2000.

SNOOKS, R. J. Another scientific separating chemistry from physics: thought experiments. *Foundations of Chemistry*, Netherlands, v. 8, n. 3, p. 255-270, 2006.

SOLBES, J. et al. Diseño de un curriculum para la introducción del modelo atómico cuántico. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 5, n. extra, p. 209-210, 1987.

SORENSEN, R. Vagueness within the Language of Thought. *The Philosophical Quarterly*, St Andrews, v. 41, n. 165, p. 389-413, 1991.

STEFANEL, A. Uma experiência en el marco de la introductión de la física cuántica em la escuela secundaria. *Revista de Enseñanaza de La Fisica*, Rosário, v. 11, n. 2, p. 35-44, 1998.

SUASSSUNA, L. *Linguagem como discurso*: implicações para as práticas de avaliação. 2004. 356f. Tese (Doutorado em Linguística)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

TASHAKKORI, A.; TEDDLIE, C. *Mixed methodology:* combining qualitative and quantitative approaches. New York: Sage, 1998.

TERRAZAN, E. A. *Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média*. 1994. Tese (Doutorado em)–Pós-Graduação em Educação, Universidade de São Paulo, 1994.

TERRAZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.

THIOLENT, M. *Metodologia da pesquisa-ação*. 7. ed. São Paulo: Cortez, 1996.

TONOMURA, A. et al. Demonstration of Single-Electron Buildup of Interference Pattern. *American Journal Physics*, Japão, v. 57, p. 117-120, fev. 1989. Disponível em: <www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.ctm.>. Acesso em: 20 jun. 2006.

VALENTZAS, A.; HALKIA, K.; SKORDOULIS, C. *Thought experiments in the Theory of Relativity and in Quantum Mechanics*: their presence in textbooks and in popular science books. Athens: Laboratory of Science Education Epistemology and Educational Technology (ASEL), University of Athens, 2000.

VOSNIADIOU, S.; BREWER, W. S. Mental models of the earth: a study on conceptual change in childhood, *Cognitive Psycology*, Athens, v. 24, p. 535-585, 1992.

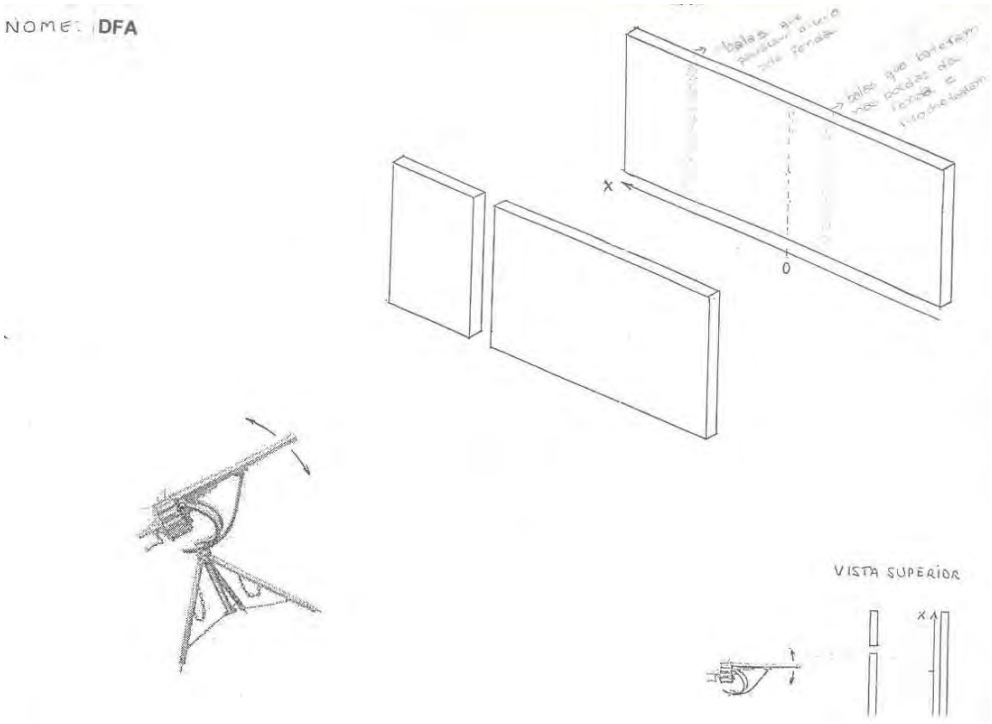
VOSNISDOU, S. Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, v. 4, p. 45-69, 1994. Disponível em: <http://www.cs.phs.uoa.gr/en/staff/32.%20vosniadou%201994.pdf >. Acesso em: 05 jun. 2007.

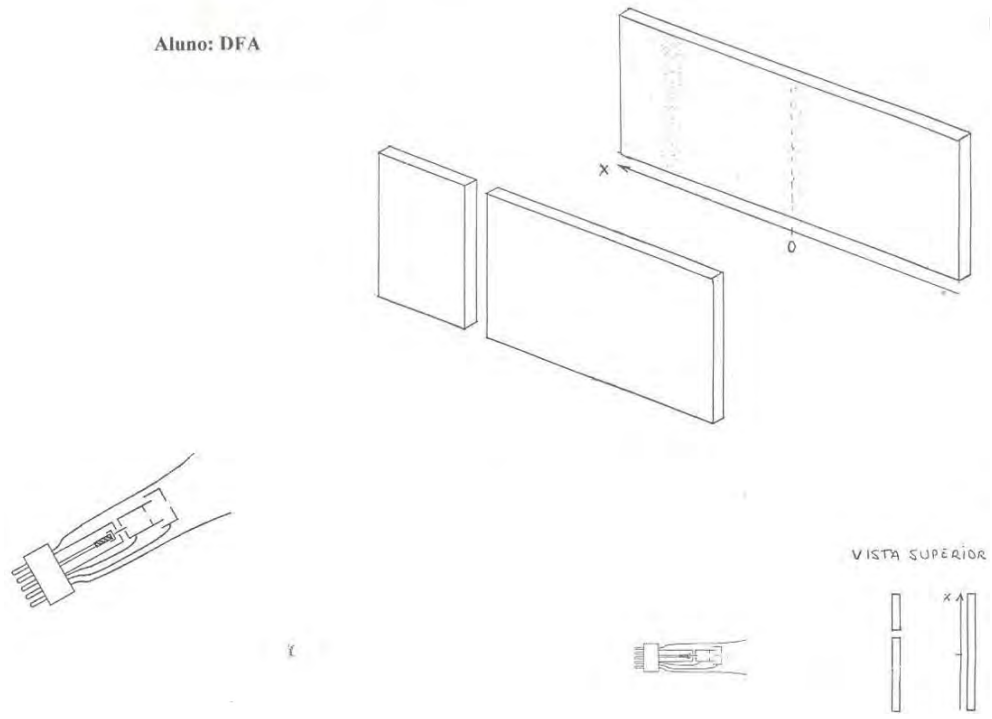
YOUNG, T. *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*. London: Taylor and Walton, 1845. v. 2.

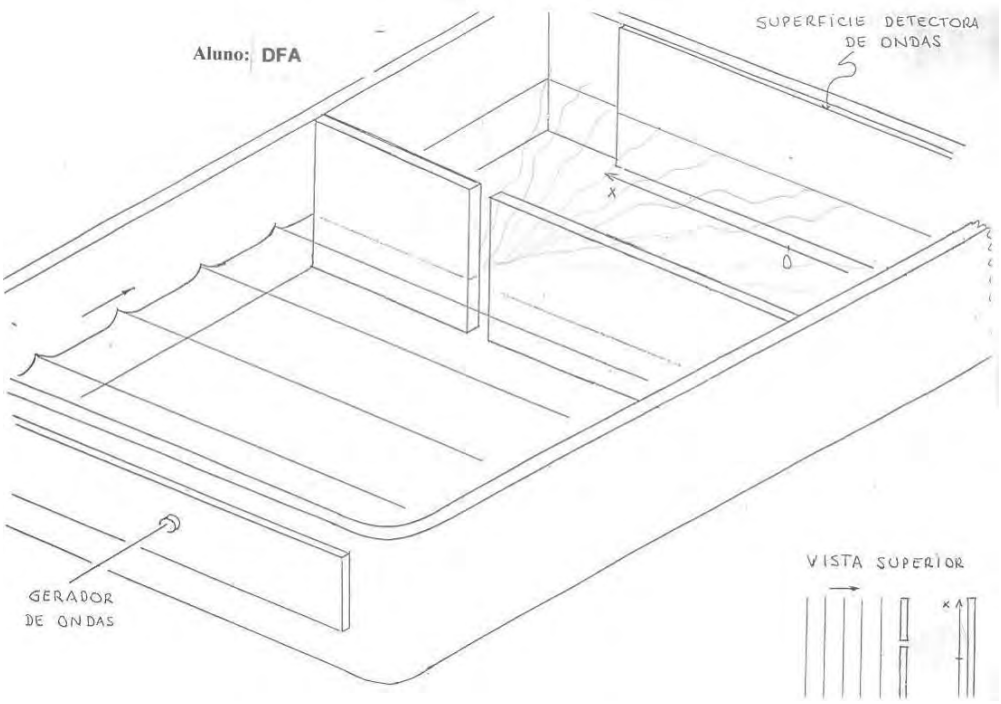
YOU TUBE. *Double slit theory Quantum Physics Animation*. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=0ElSXo1HWS4>. Acesso em: 20 jun. 2006.

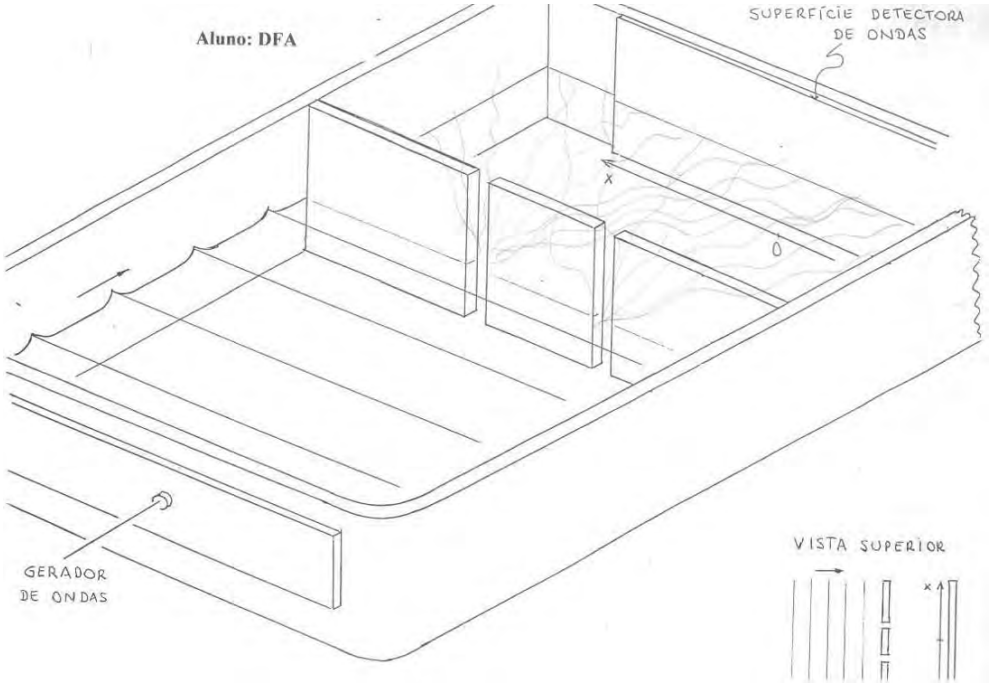
APÊNDICES

APÊNDICE A – Representação dos alunos por sigla e em ordem alfabética da terceira letra– partículas ondas e elétrons

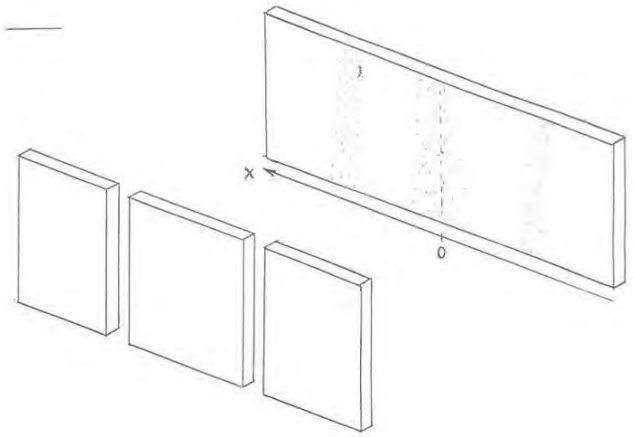


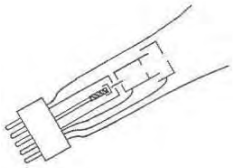



Aluno: DFA
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR


Aluno: DFA
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR

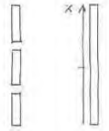
Aluno: DFA



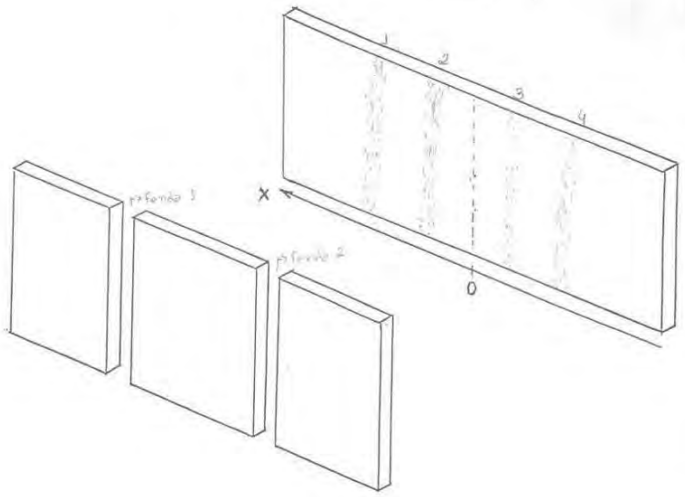


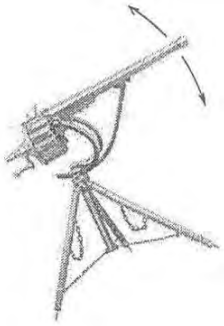
VISTA SUPERIOR



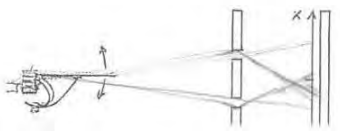


Aluno: DFA

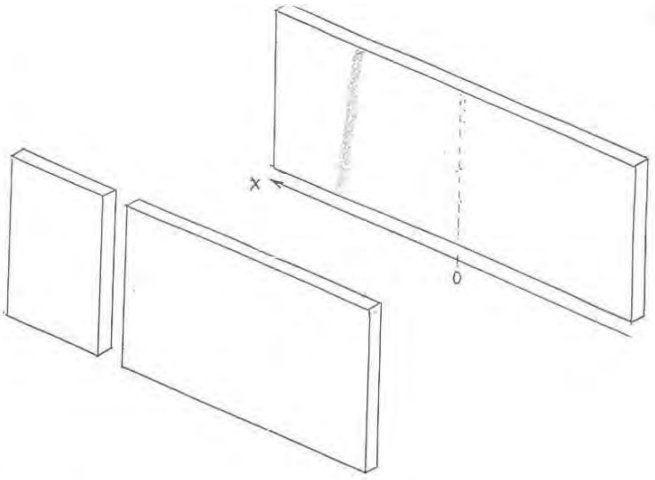


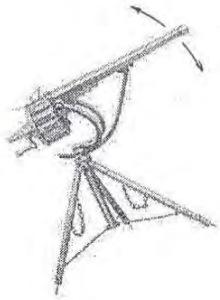


VISTA SUPERIOR

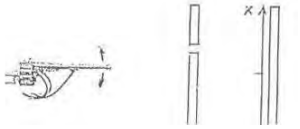


DJA

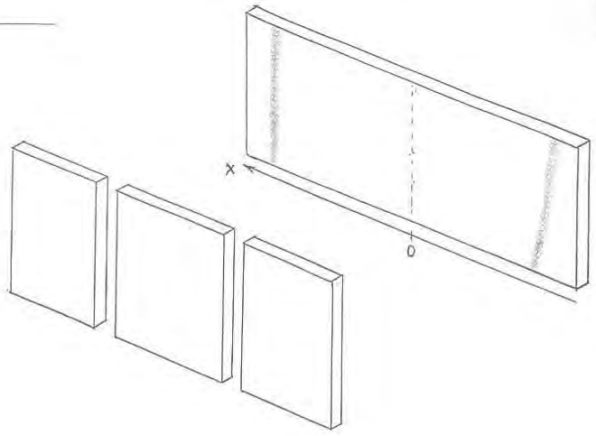


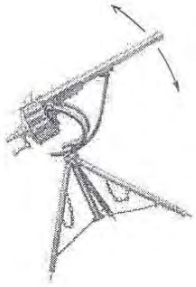


VISTA SUPERIOR

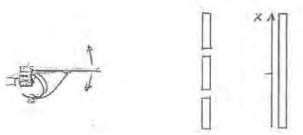


NOME: DJA

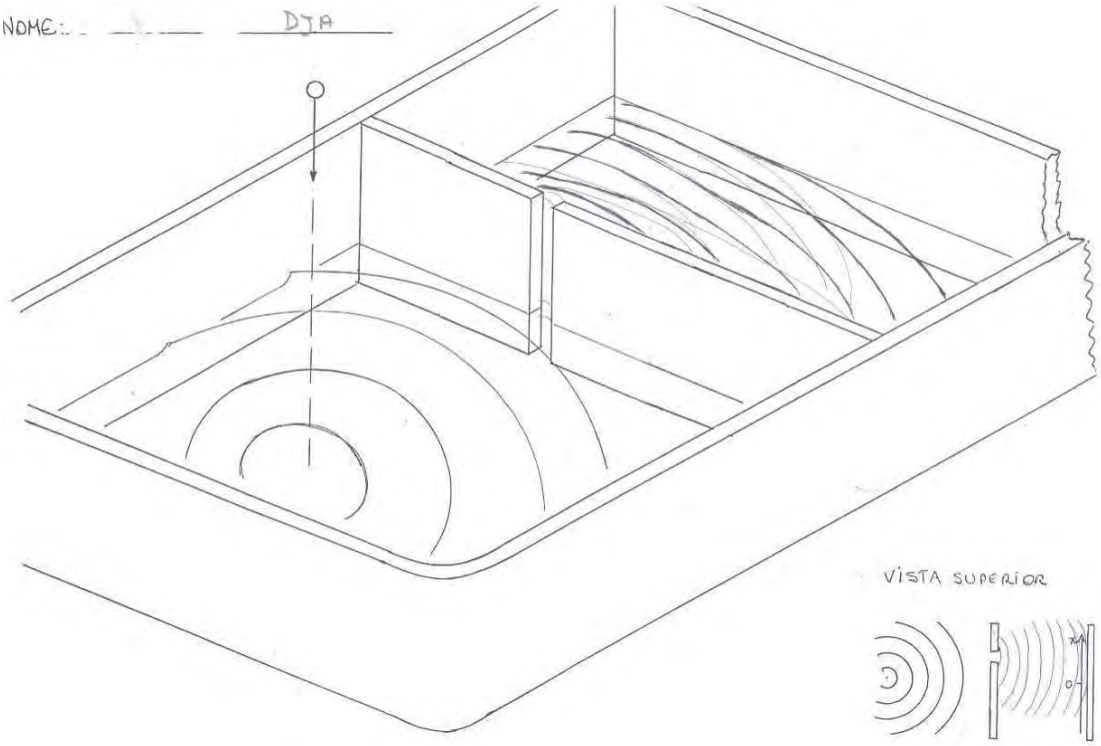




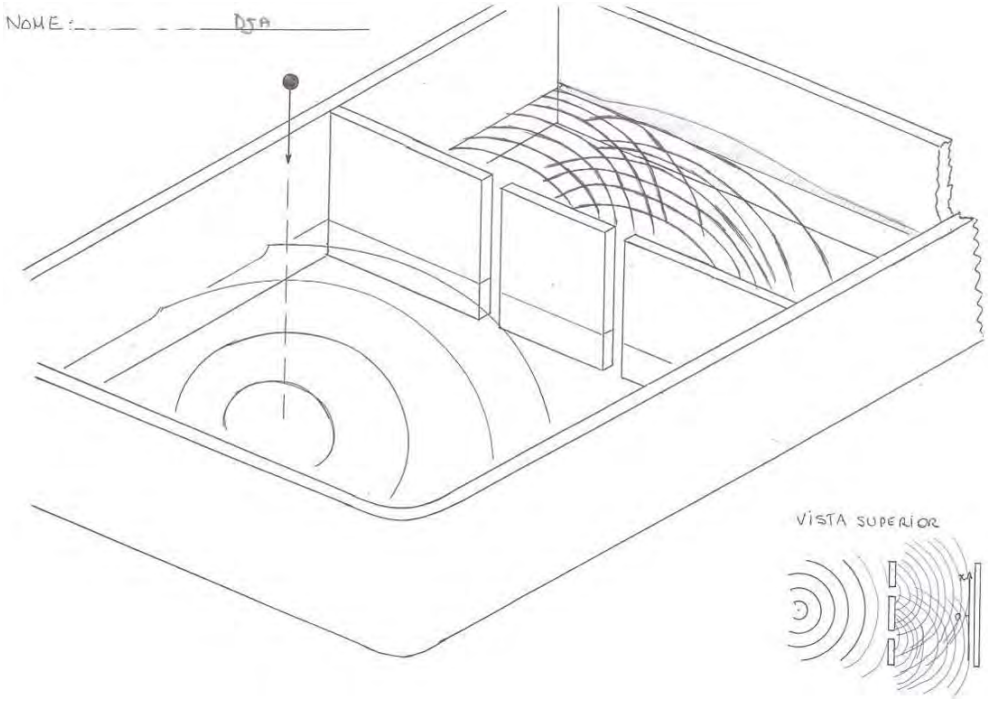
VISTA SUPERIOR



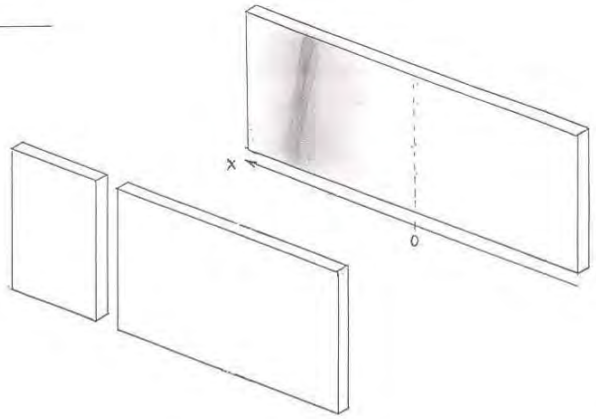
NOME: _____ DIA _____

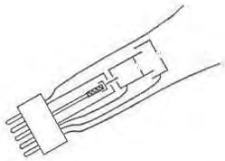


NOME: _____ DIA _____

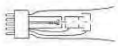


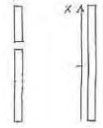
NOME: DJA



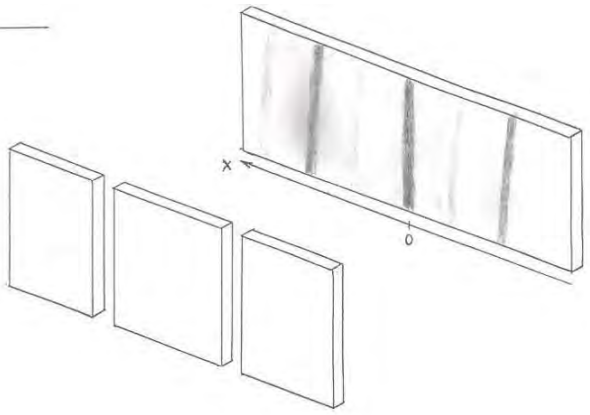


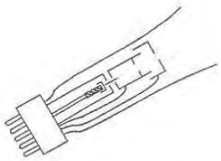
VISTA SUPERIOR





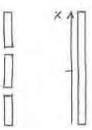
NOME: DJA



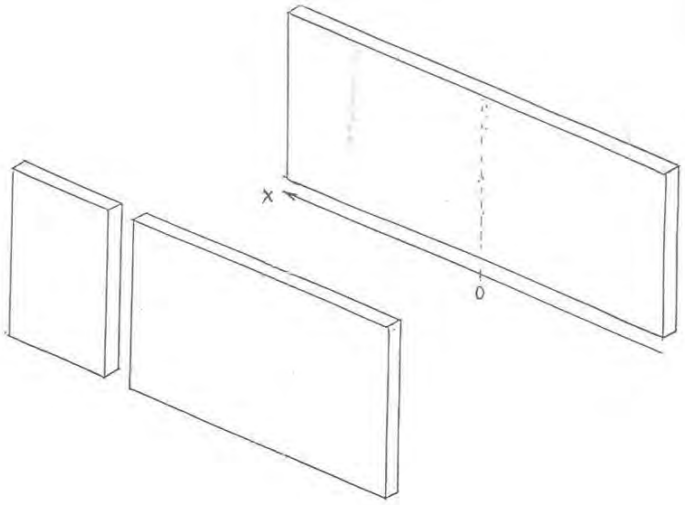


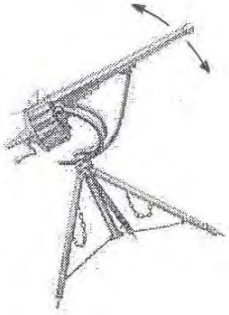
VISTA SUPERIOR



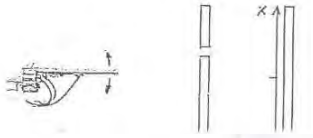


Aluno: DFC

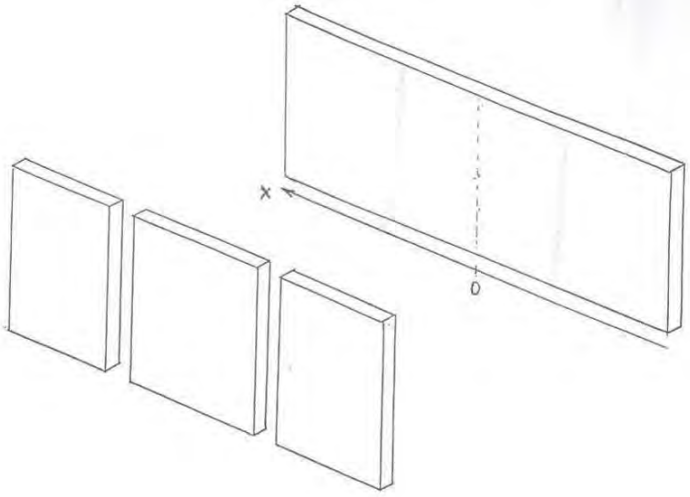


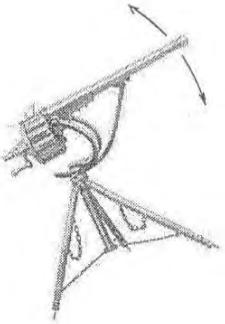


VISTA SUPERIOR



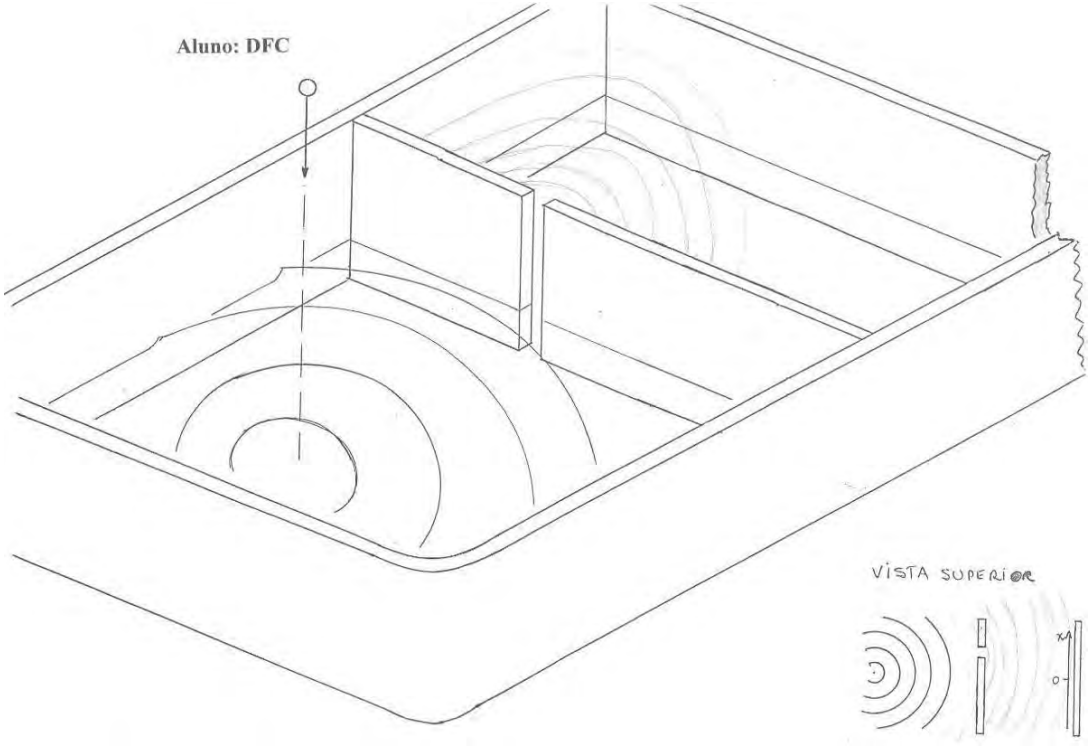
Aluno: DFC

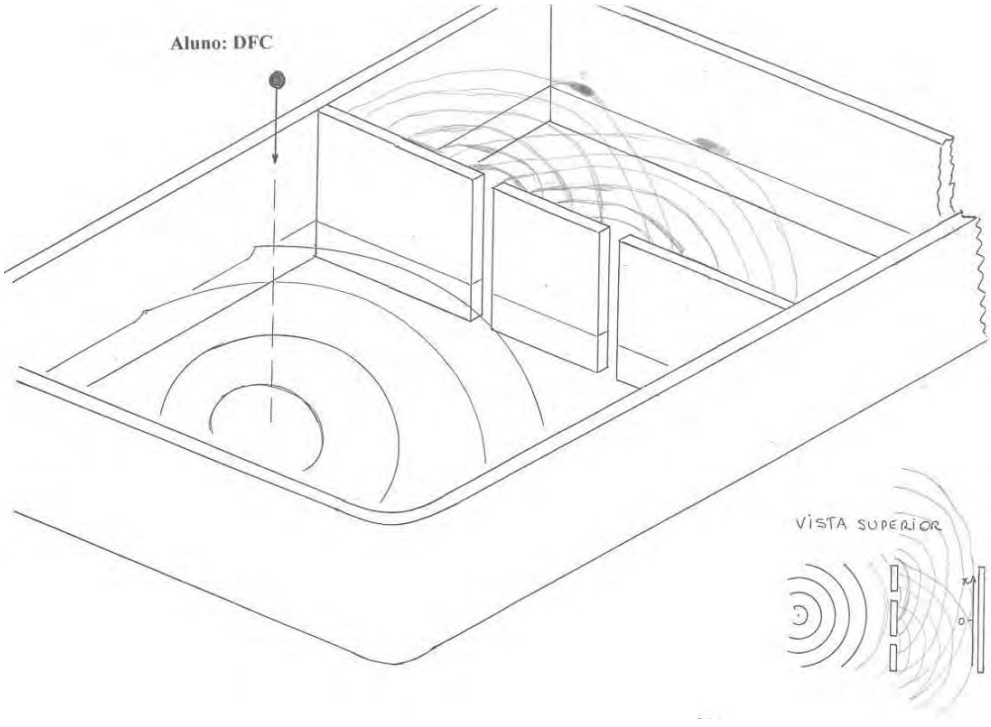




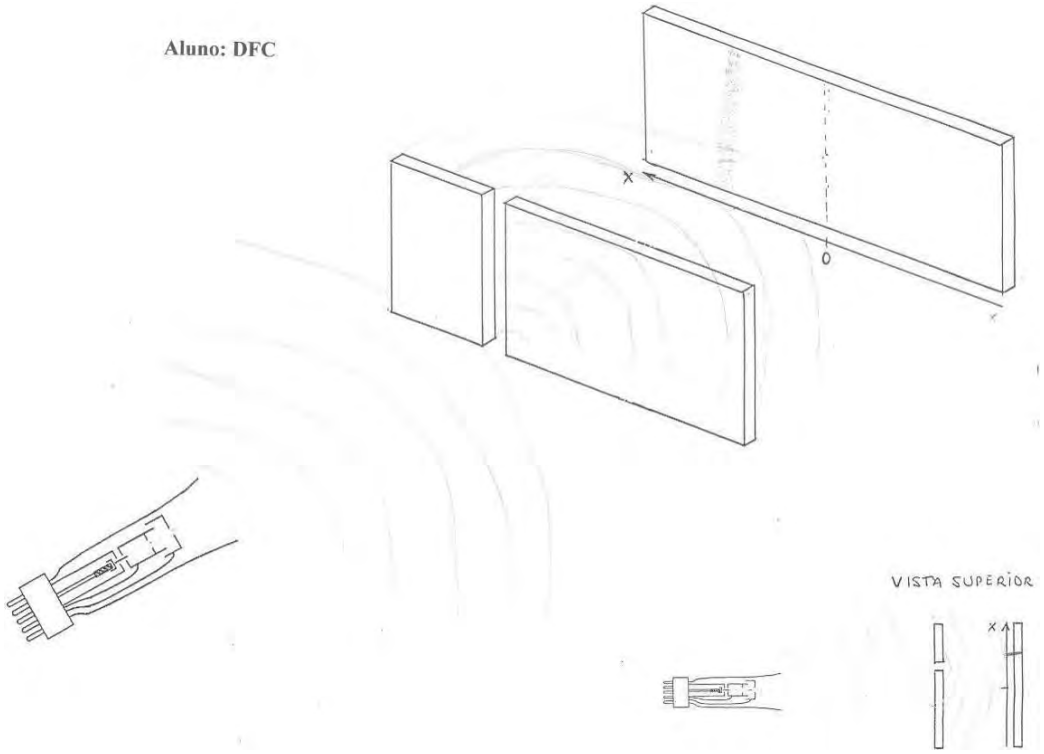
VISTA SUPERIOR



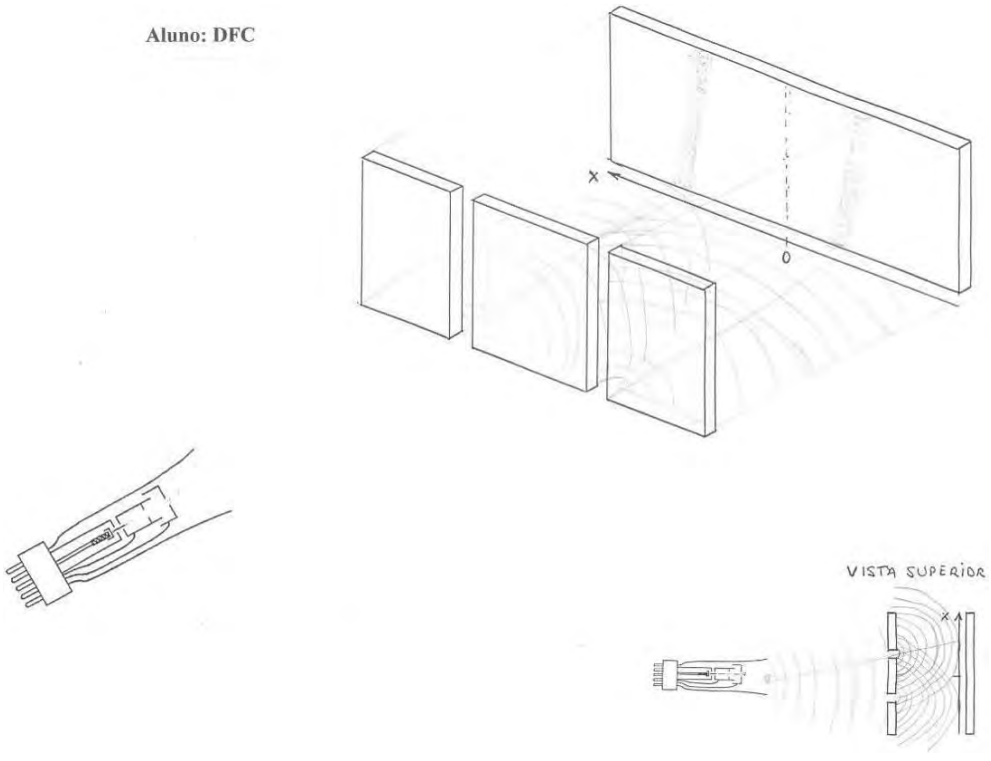

Aluno: DFC
VISTA SUPERIOR


Aluno: DFC
VISTA SUPERIOR

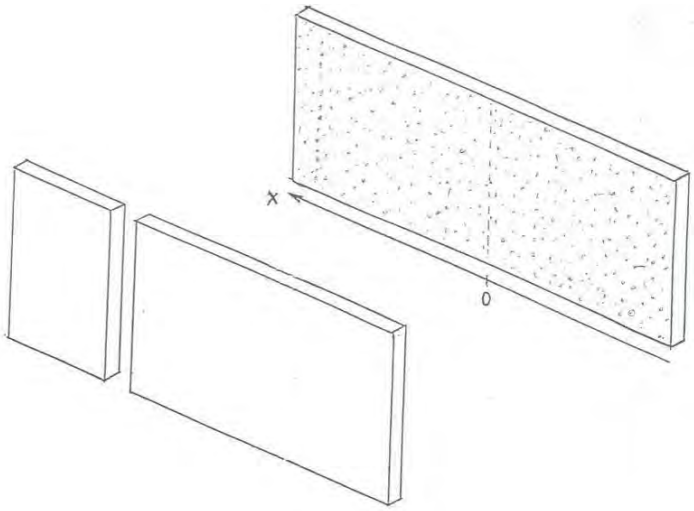
Aluno: DFC

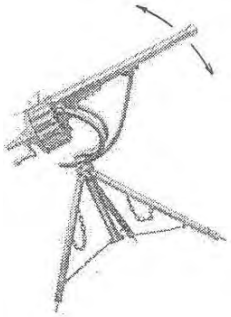


Aluno: DFC



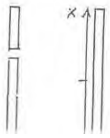
Aluno: DFE



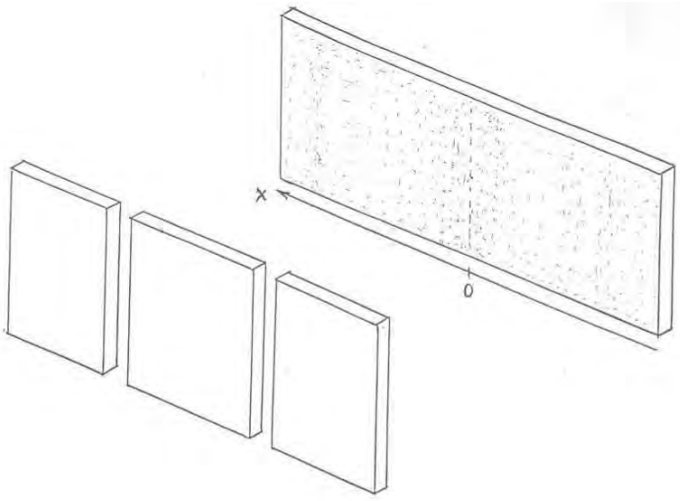


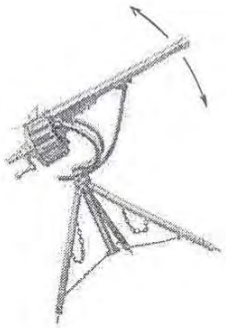
VISTA SUPERIOR



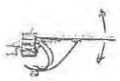


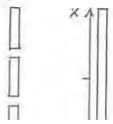
Aluno: DFE

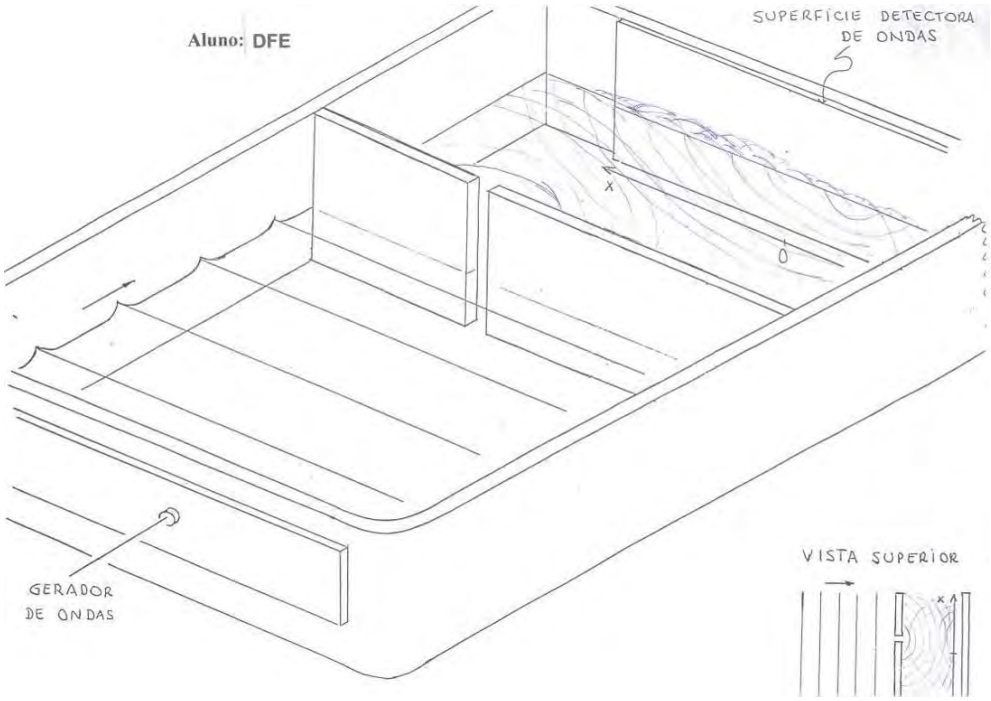


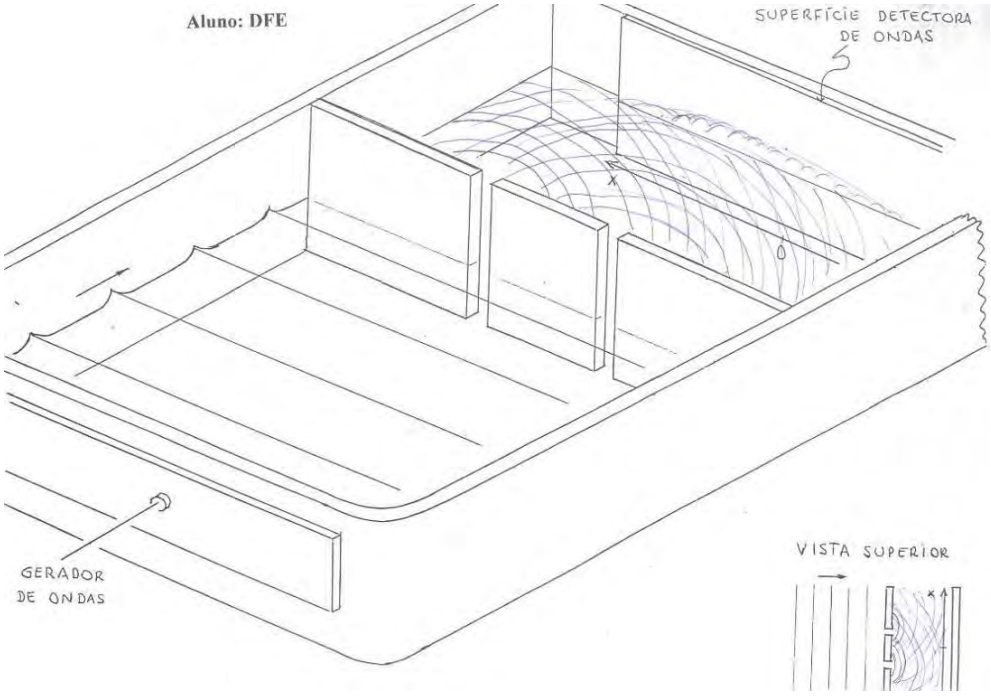


VISTA SUPERIOR

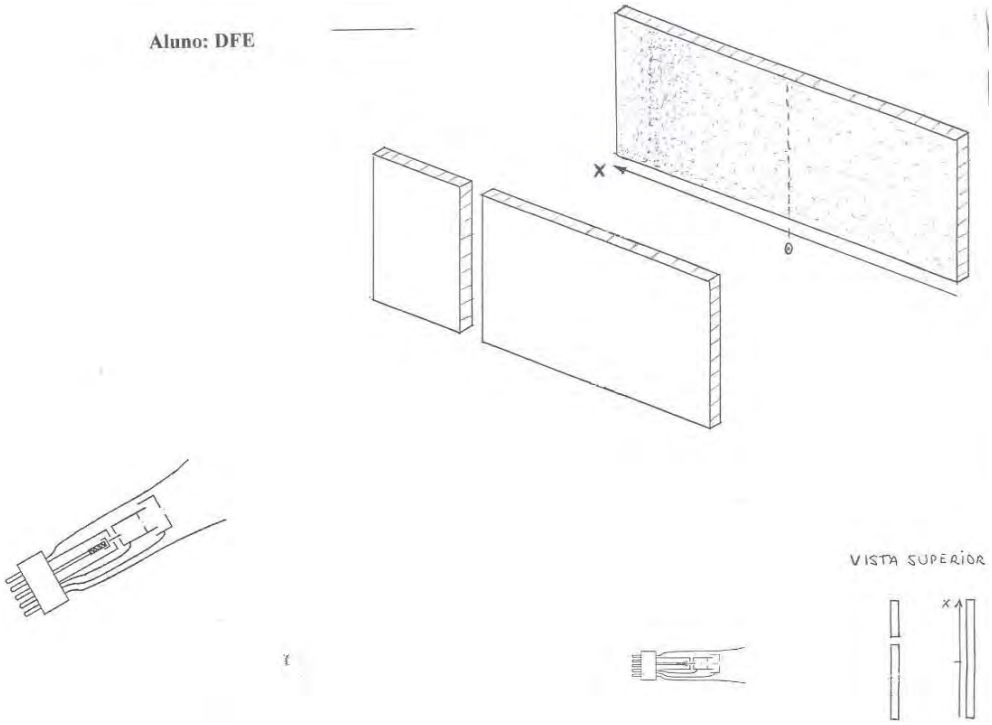




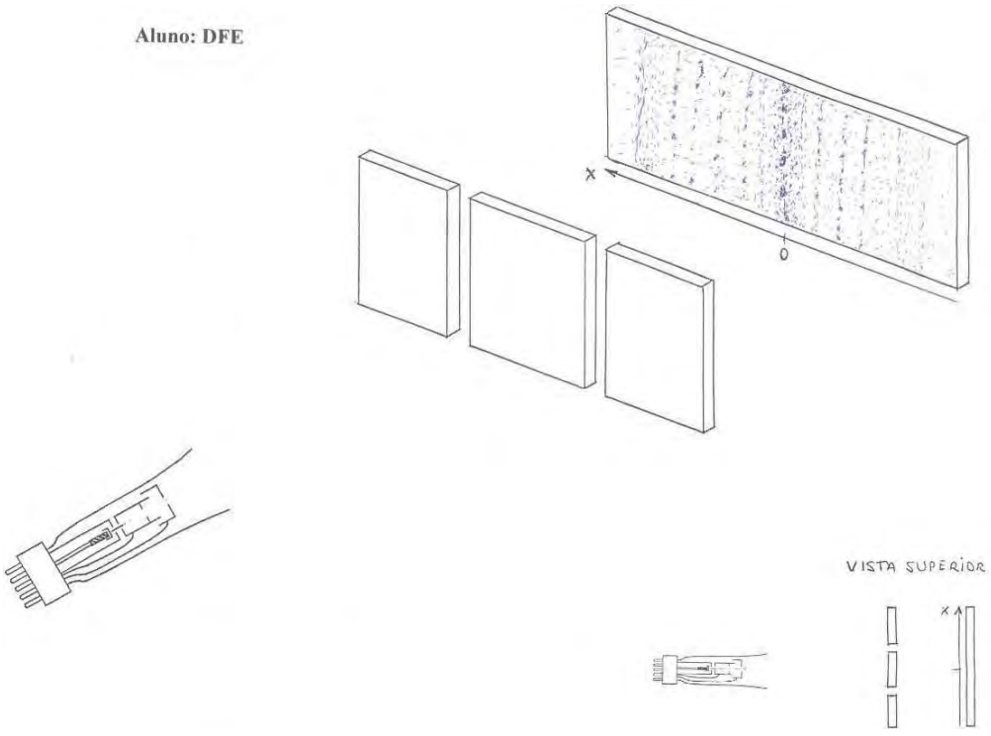

Aluno: DFE
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR


Aluno: DFE
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR

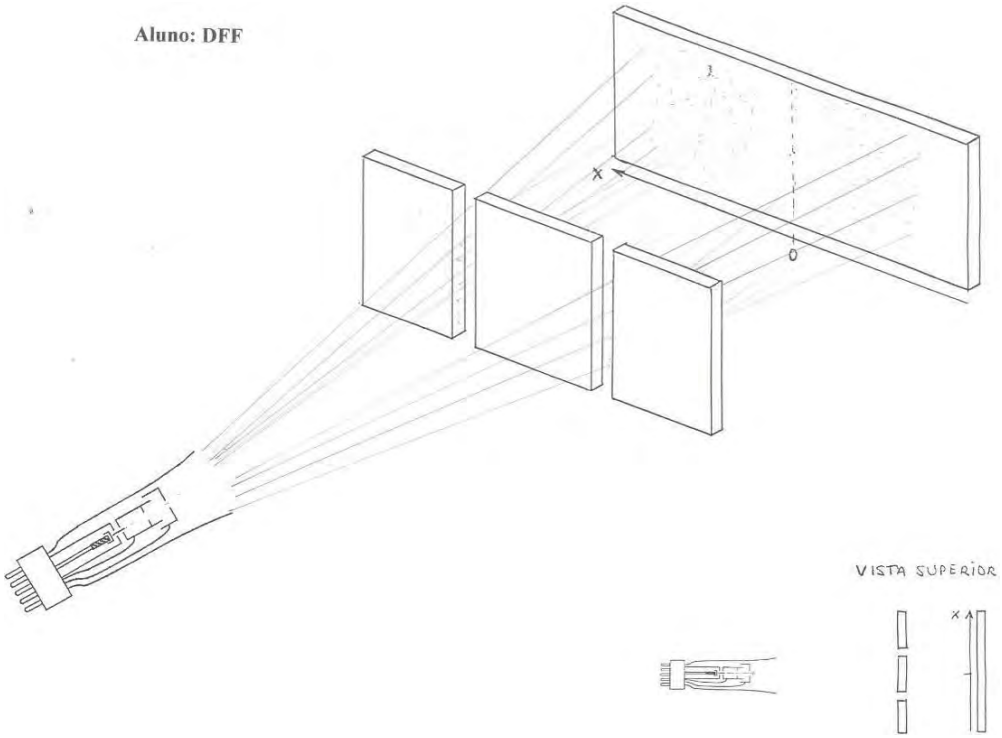
Aluno: DFE



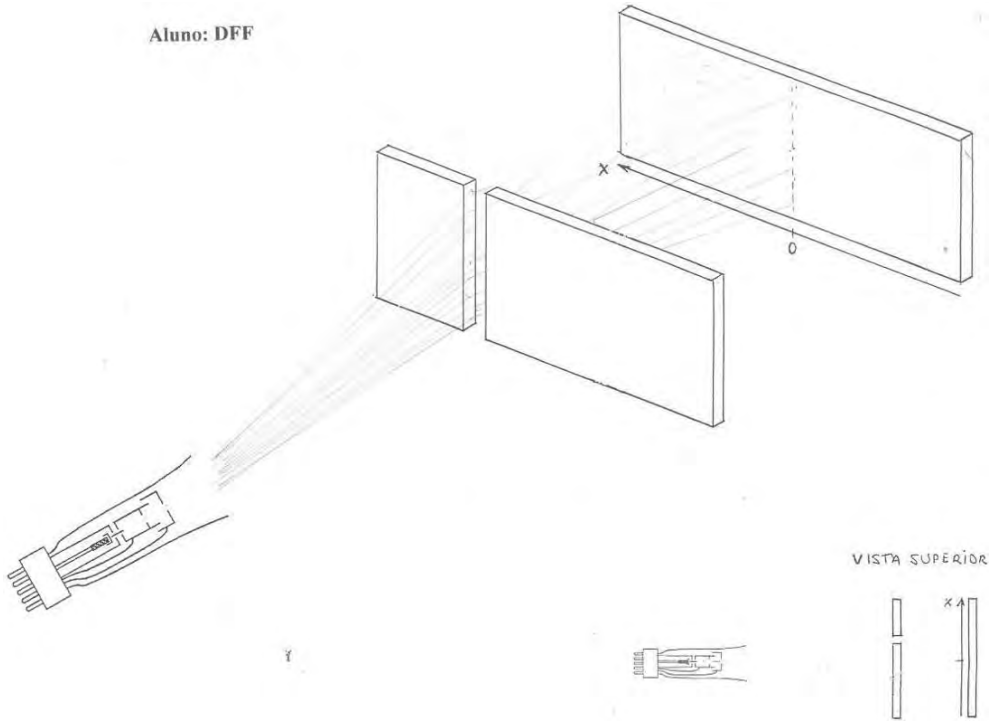
Aluno: DFE

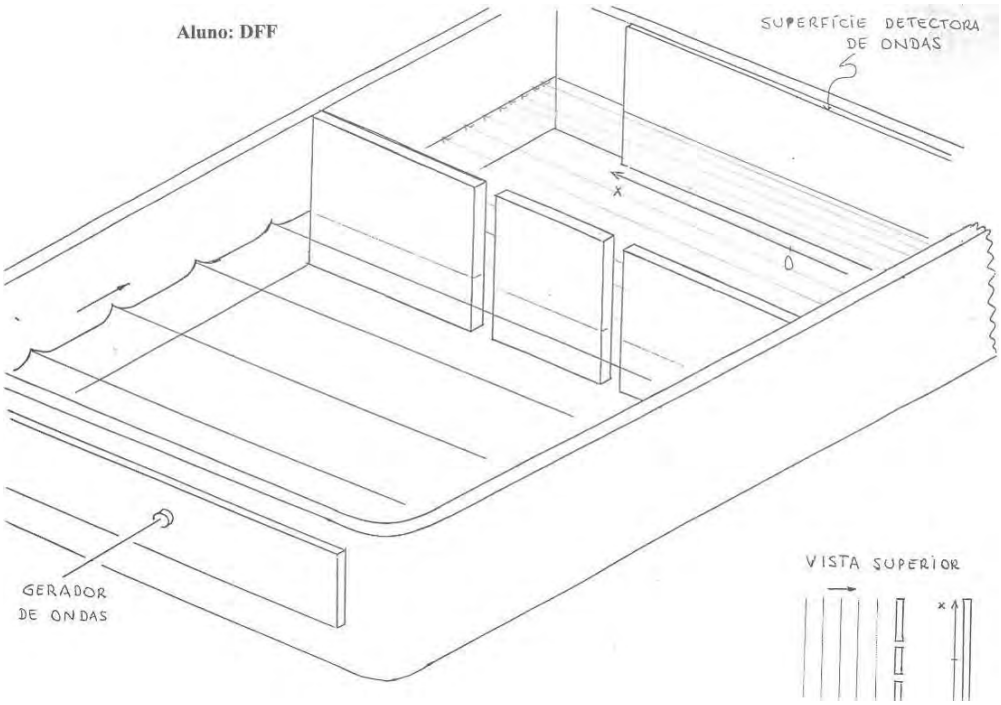


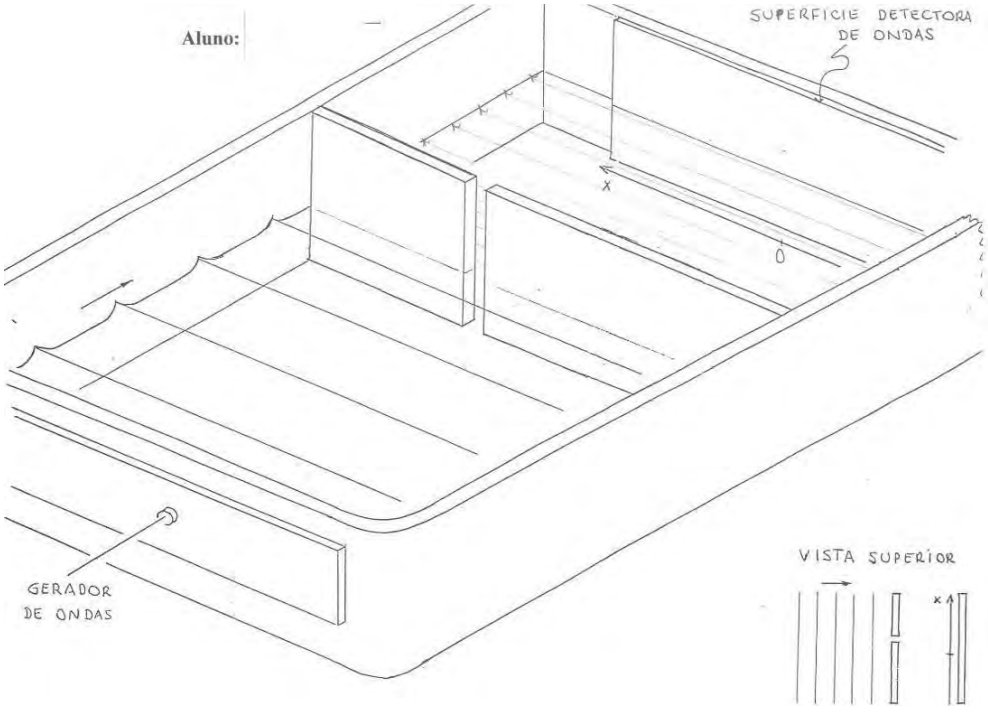
Aluno: DFF



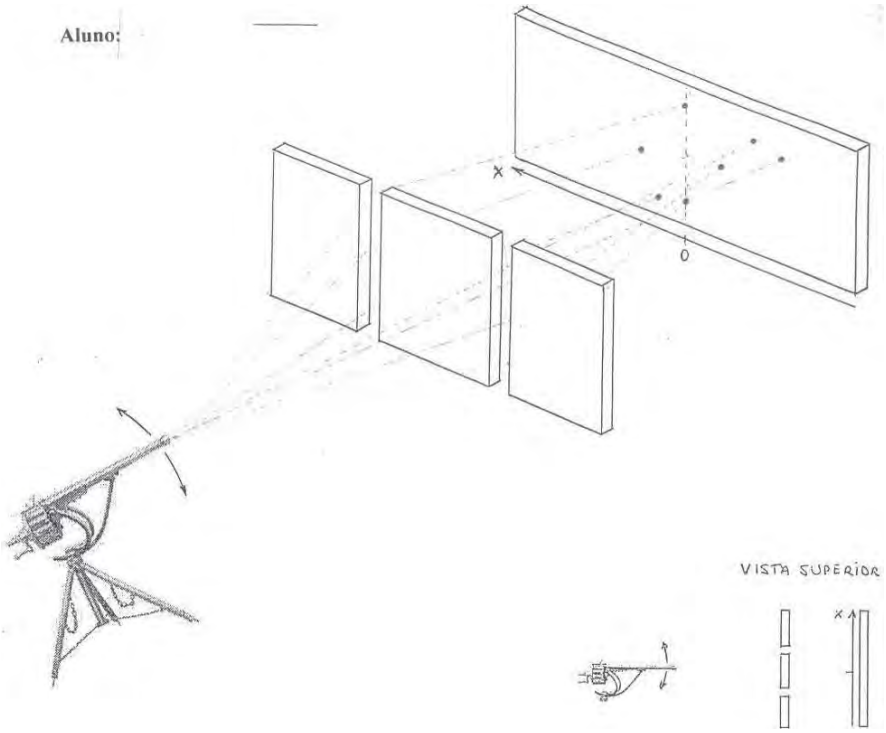
Aluno: DFF



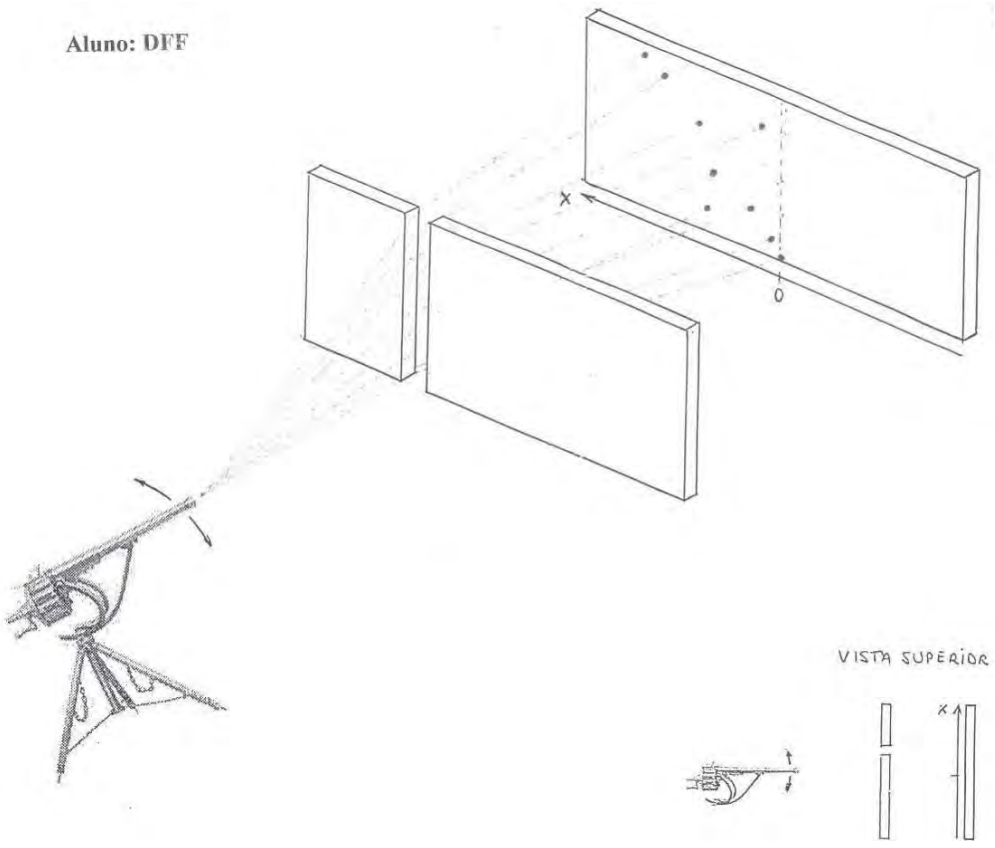

Aluno: DFF
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
x


Aluno:
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
x
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
x

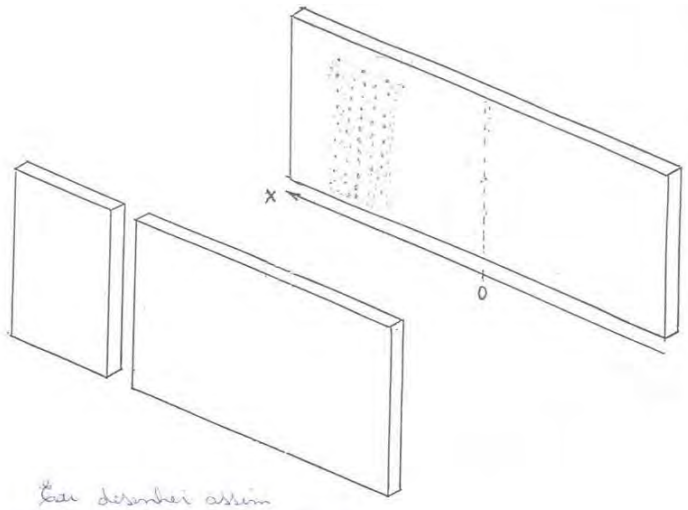
Aluno: _____

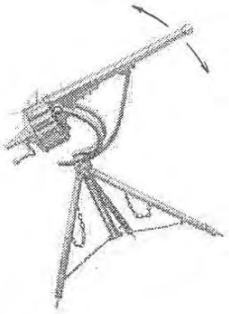


Aluno: DFF

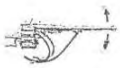


Aluno: DFJ

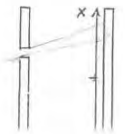




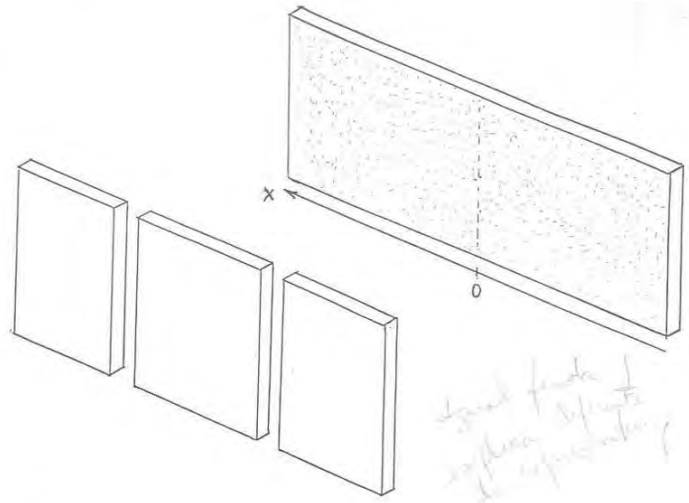
Eu desenhei assim porque como a metralhadora está presa e só seu cano é móvel, a ponta permite apenas que os balas que saíam da metralhadora em determinado posição à ultrapasse, assim fazendo um esquema na figura vista de cima observei + ou - o espaço que os balas consequiam atingir na parede de trás.

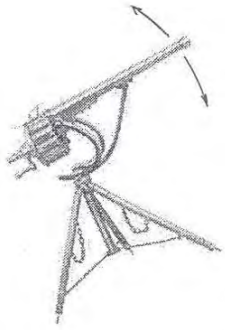


VISTA SUPERIOR

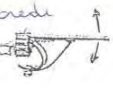


Aluno: DFJ

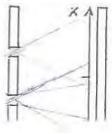


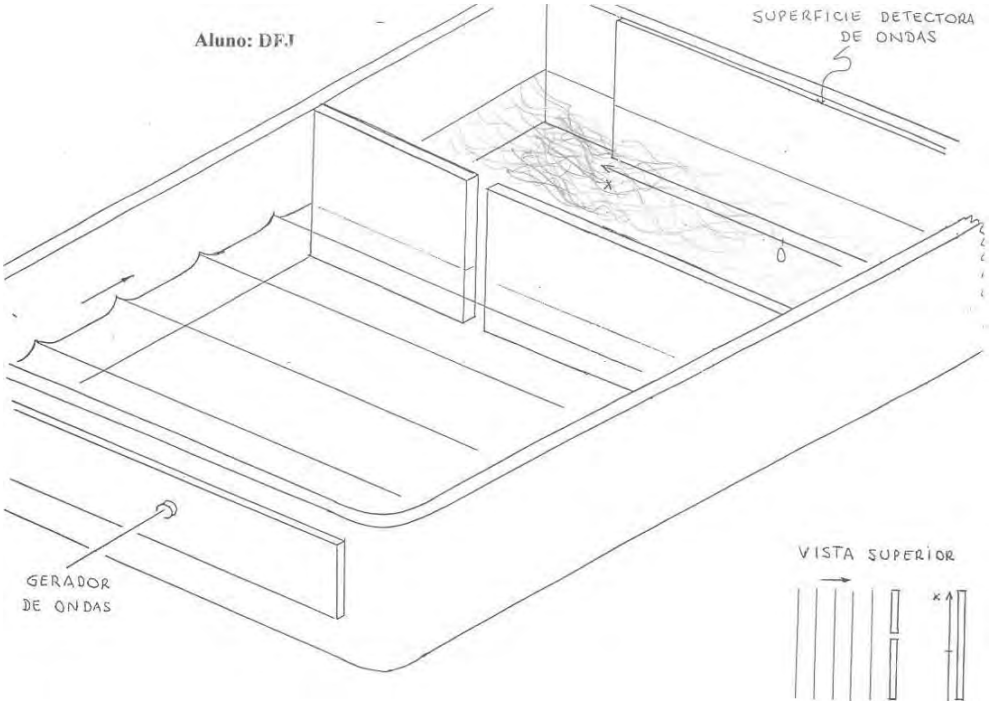


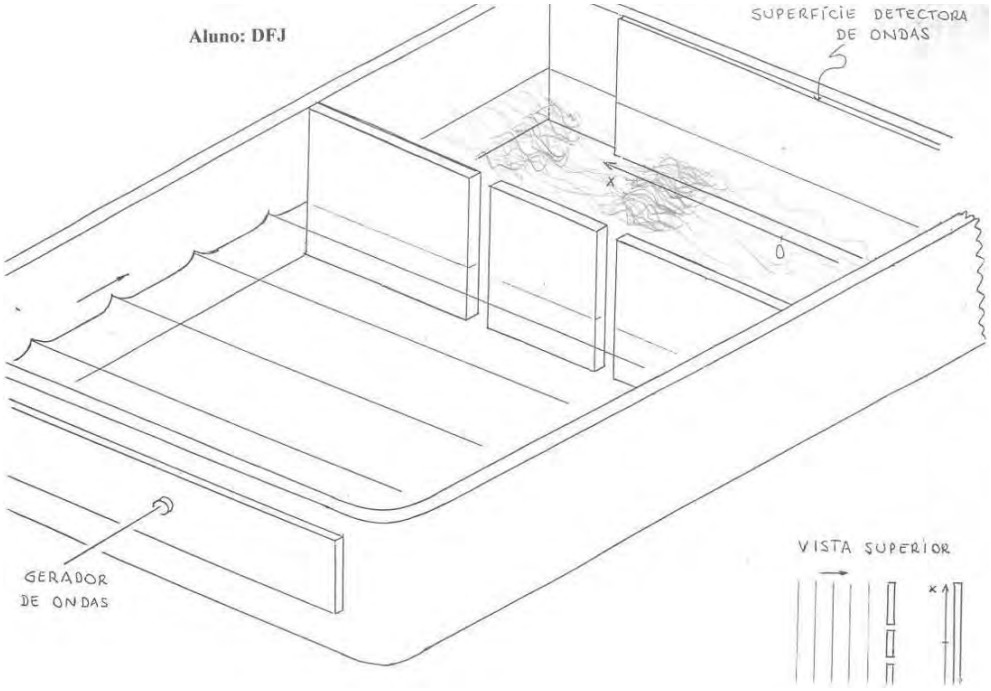
Como explicou na figura anterior meu critério para ter desenho de tal modo os balas, o mesmo se enquadra para esta figura, porém na hora de desenhar não fiz de forma correta pois os balas não vão atingir a parede toda, mas sim parte dela em cada metade da parede.



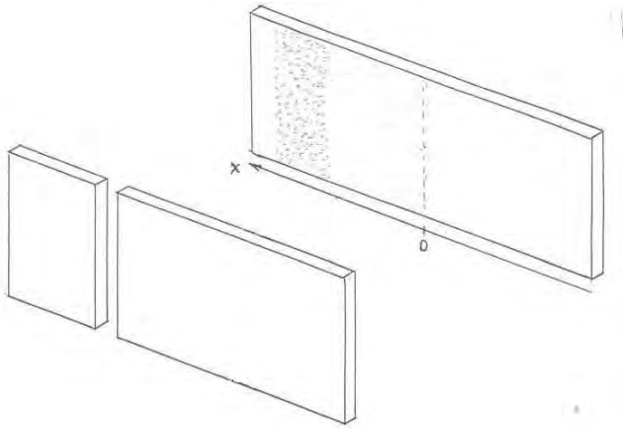
VISTA SUPERIOR

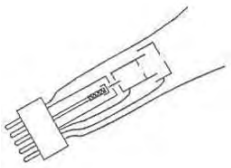



Aluno: DFJ
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR


Aluno: DFJ
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR

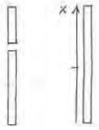
Aluno: DFJ



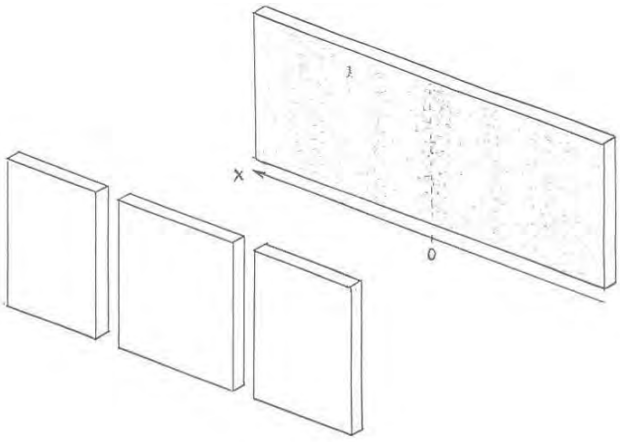


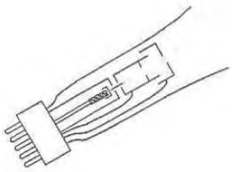
VISTA SUPERIOR





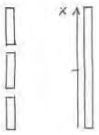
Aluno: DFJ



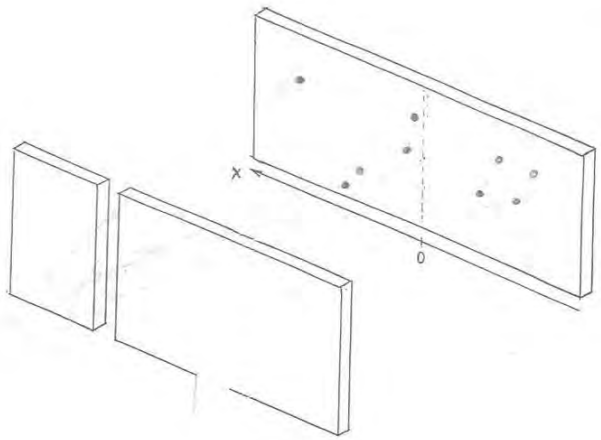


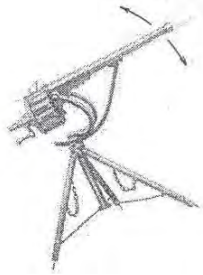
VISTA SUPERIOR



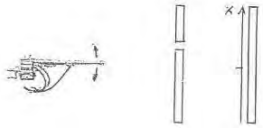


NOME: DFL

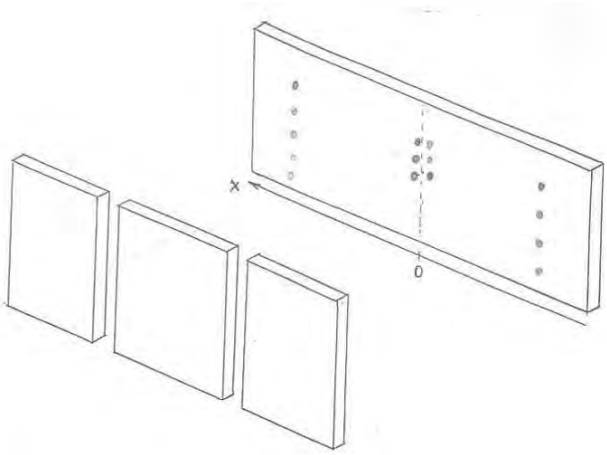


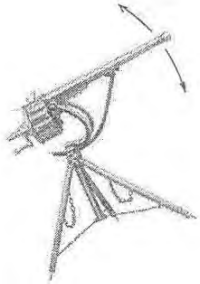


VISTA SUPERIOR

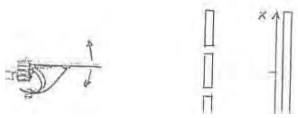


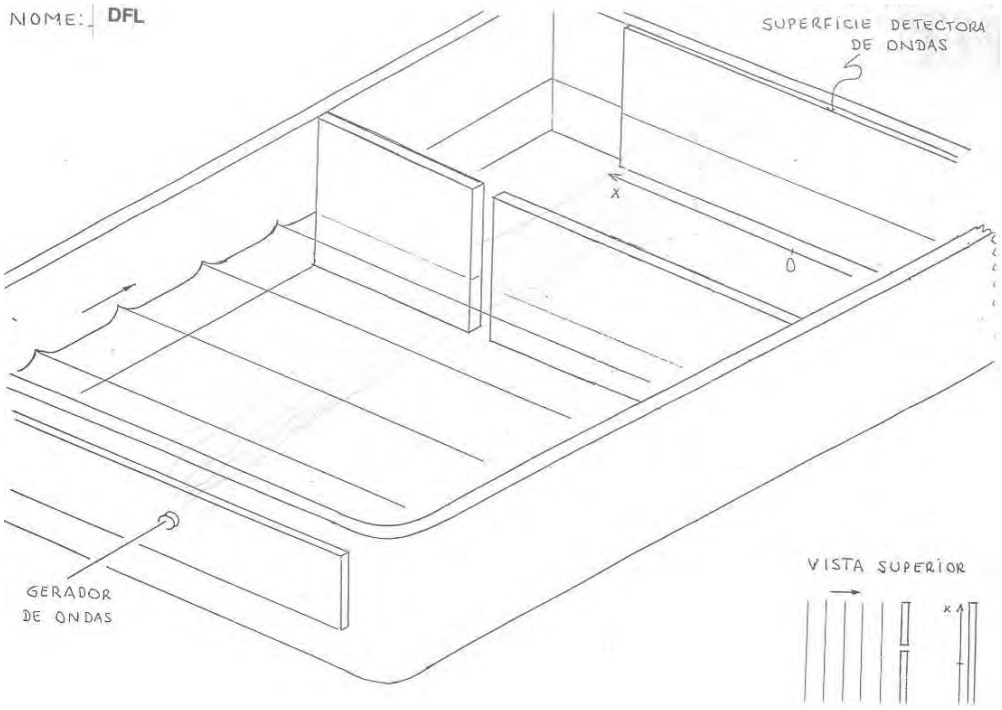
NOME: DFL

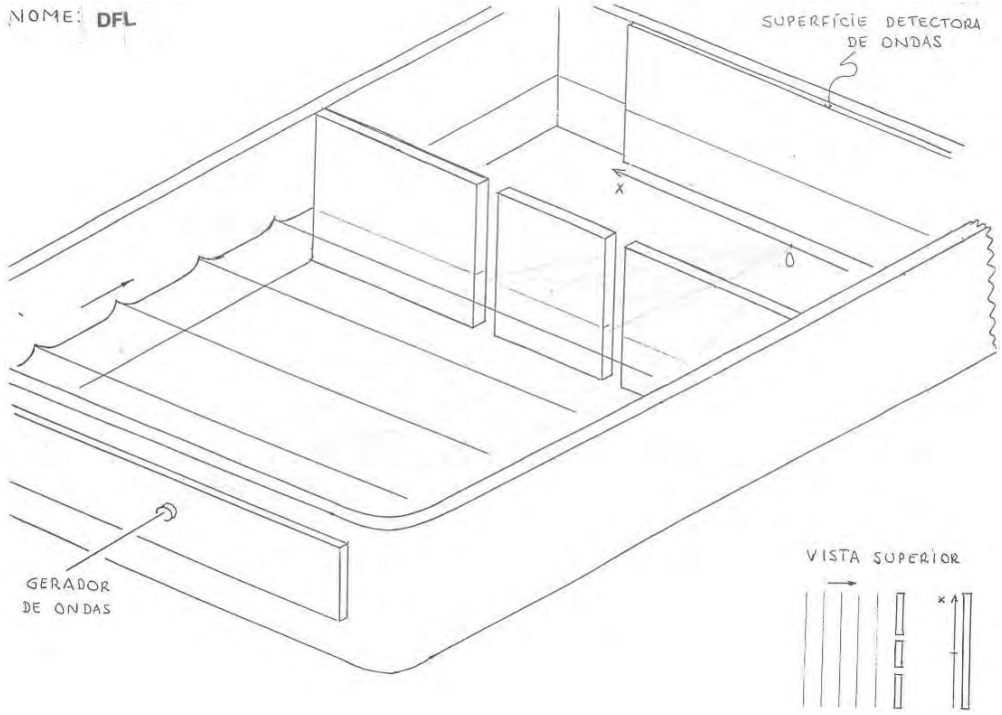




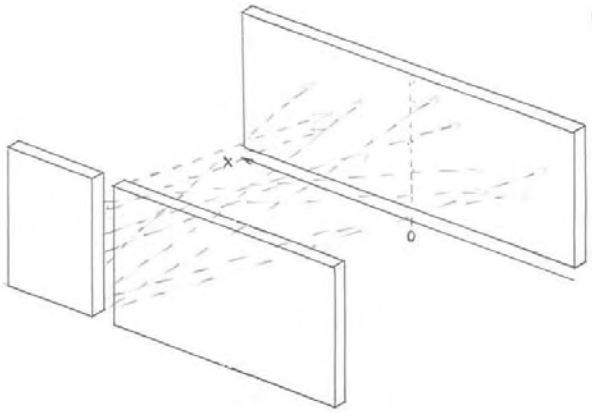
VISTA SUPERIOR

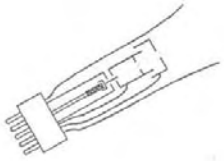



NOME: DFL
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
X
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
X


NOME: DFL
SUPERFÍCIE DETECTORA DE ONDAS
X
0
GERADOR DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
X

NOME: DFL



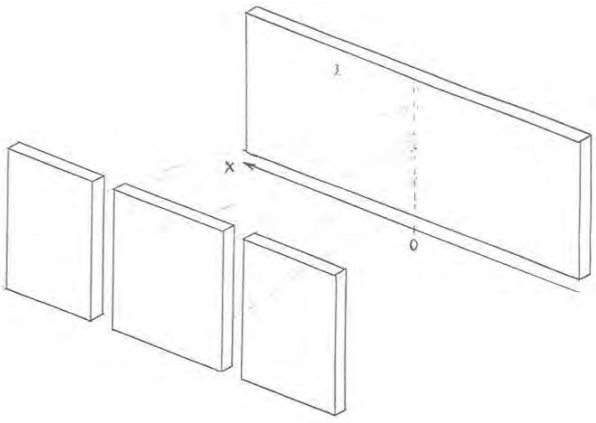


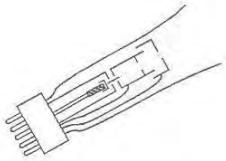
VISTA SUPERIOR





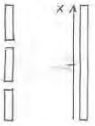
NOME: DFL



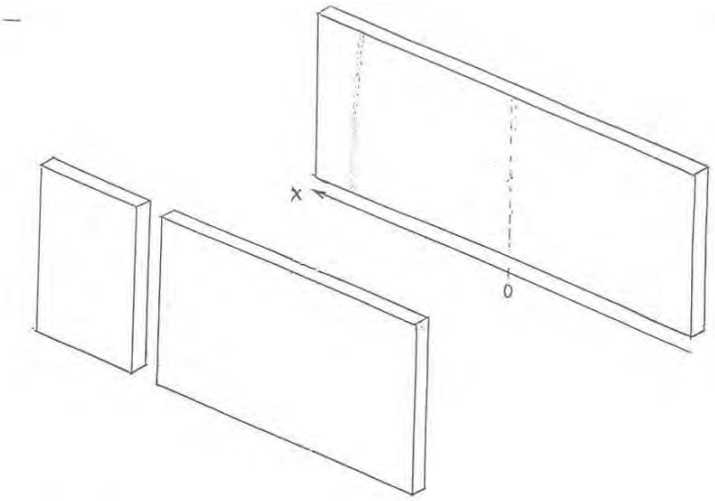


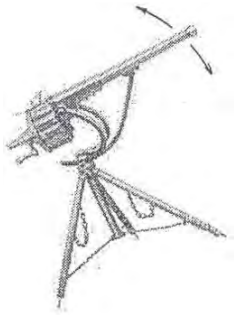
VISTA SUPERIOR



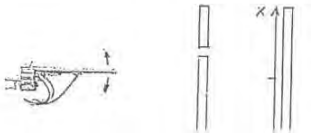


Aluno: DMM

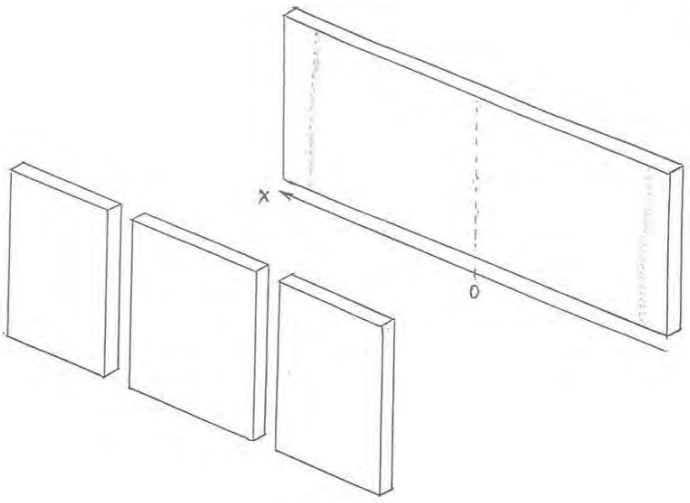


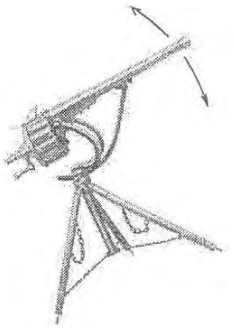


VISTA SUPERIOR

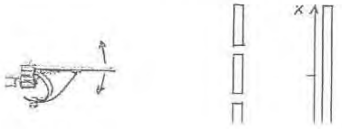


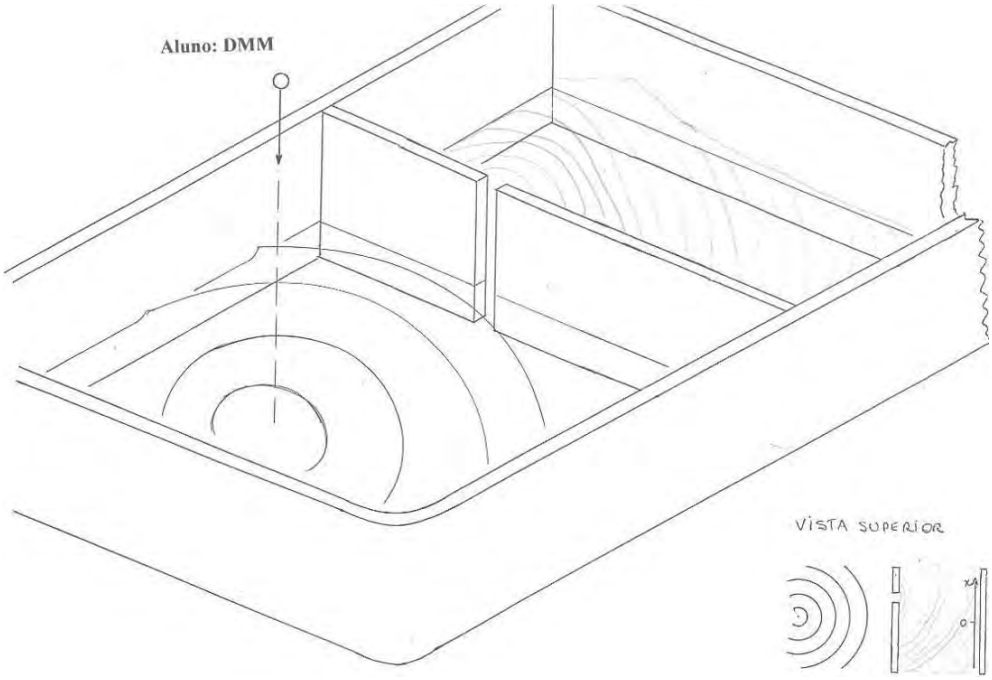
Aluno: DMM

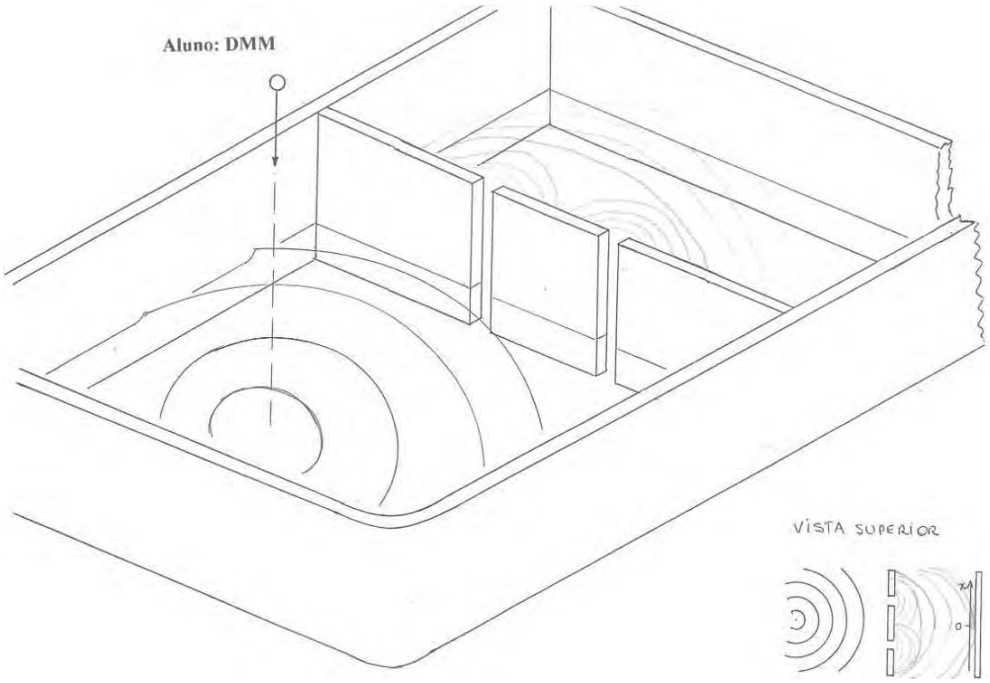




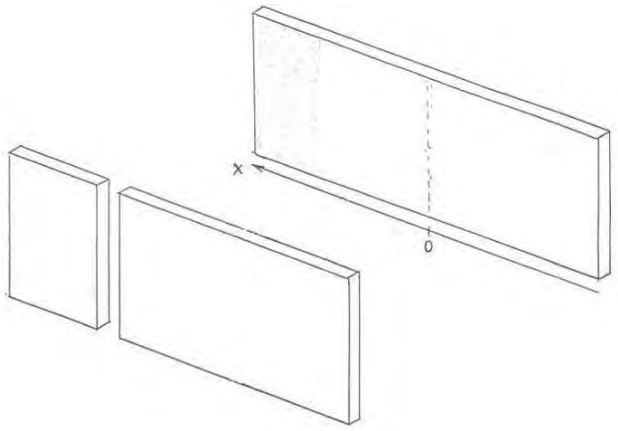
VISTA SUPERIOR

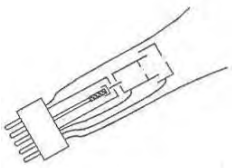



Aluno: DMM
VISTA SUPERIOR


Aluno: DMM
VISTA SUPERIOR

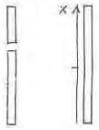
Aluno: DMM



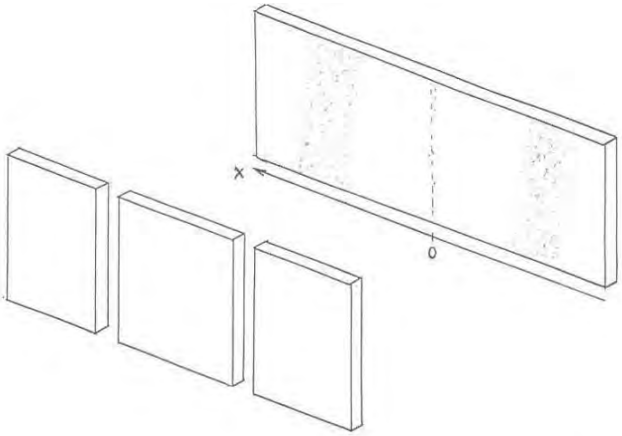


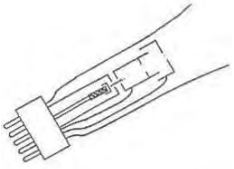


VISTA SUPERIOR



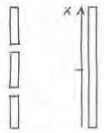
Aluno: DMM



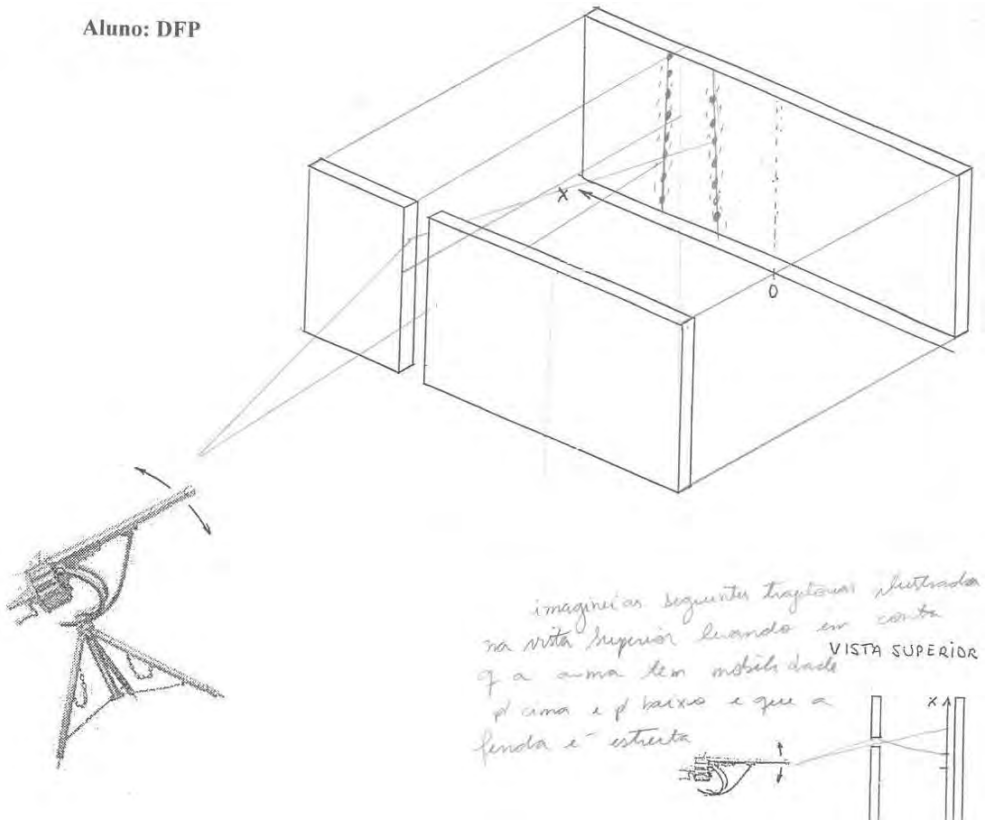


VISTA SUPERIOR

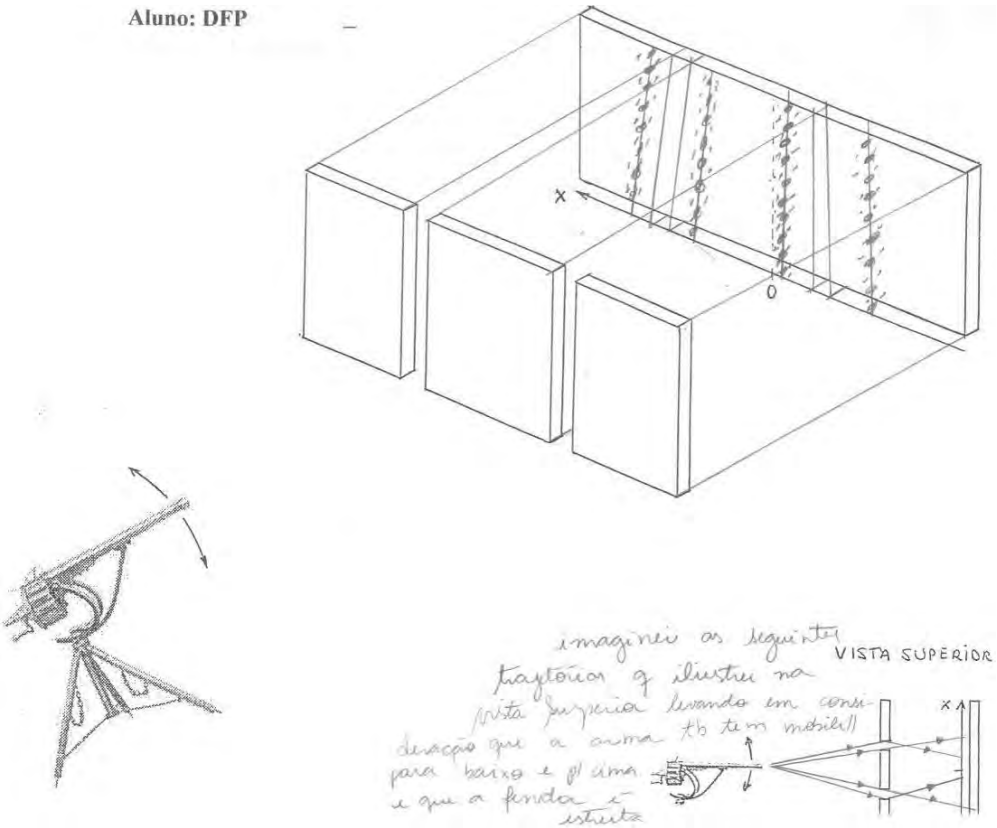


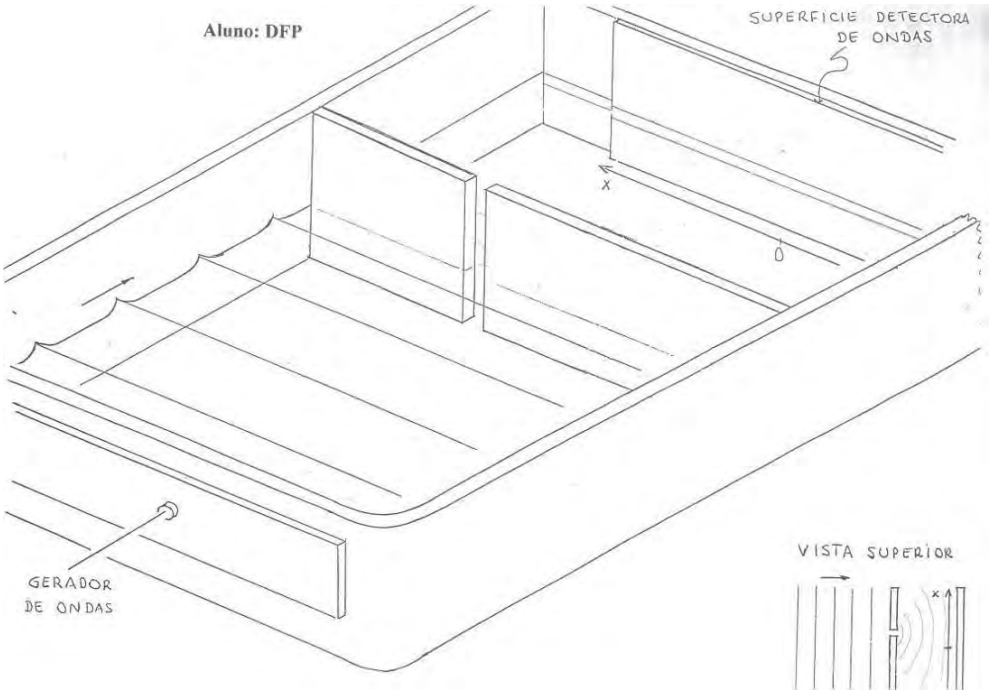


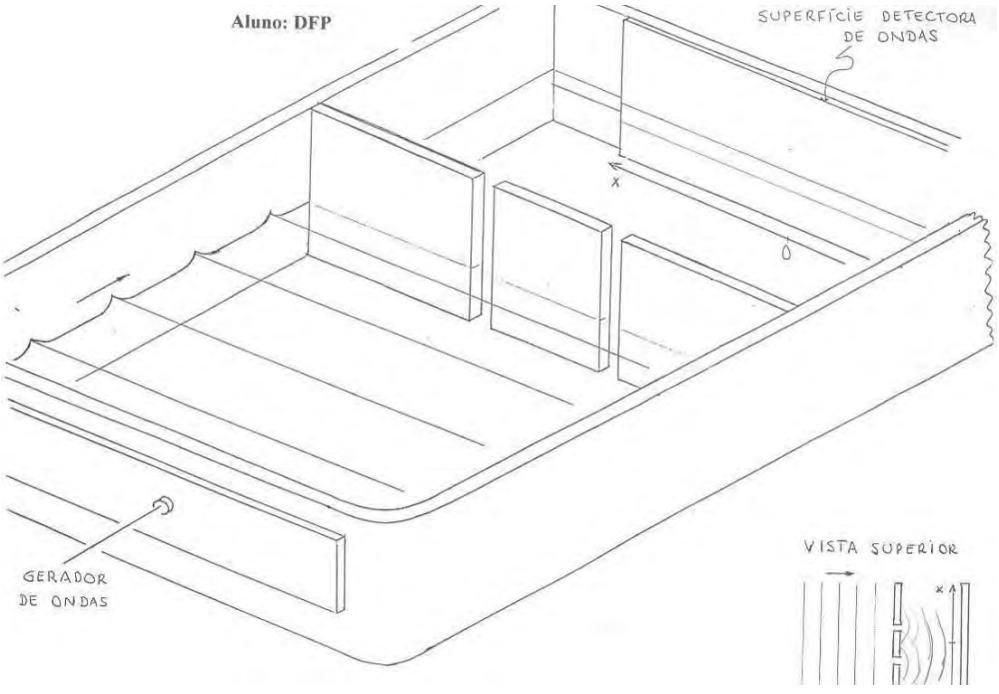
Aluno: DFP



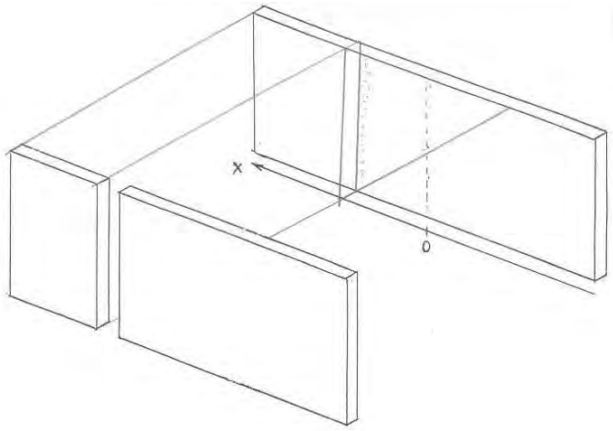
Aluno: DFP

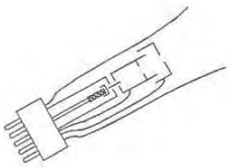



Aluno: DFP
SUPERFICIE DETECTORA
DE ONDAS
x
0
GERADOR
DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
x


Aluno: DFP
SUPERFÍCIE DETECTORA
DE ONDAS
x
0
GERADOR
DE ONDAS
VISTA SUPERIOR
x

Aluno: DFP

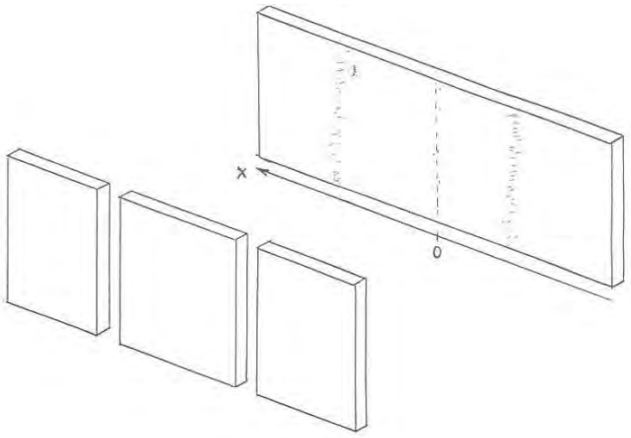


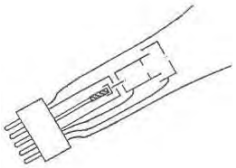


VISTA SUPERIOR

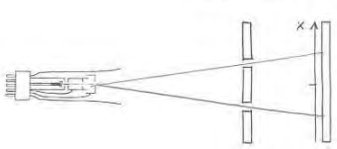


Aluno: DFP





VISTA SUPERIOR



APÊNDICE B – Texto de Feynman e Colaboradores

The Feynman

LECTURES ON PHYSICS

FEYNMAN . LEIGHTON . SANDS

1.1 Mecânica atômica
1.2 Um experimento com projéteis
1.3 Um experimento com ondas
1.4 Um experimento com elétrons
1.5 A interferência de ondas de elétrons
1.6 Observando os elétrons
1.7 Primeiros princípios da mecânica quântica
1.8 O princípio da incerteza

Comportamento Quântico

1.1 Mecânica atômica

"Mecânica Quântica" é a descrição do comportamento da matéria e da luz em todos os seus detalhes e, em particular, dos fenômenos em escala atômica. Em escala muito reduzida, a natureza se comporta de modo completamente diferente daquele a que estamos habituados. No mundo quântico, as coisas não se comportam como ondas, nem como partículas, nem como nuvens ou bolas de bilhar, nem como massas presas a molas, ou como outros arranjos físicos que nos são familiares. Enfim, as coisas se comportam de modo jamais visto.

Newton imaginava que a luz era constituída de partículas, até que se descobriu que ela se comportava como uma onda. Mais tarde, contudo, no começo do século XX, foi descoberto que, de fato, a luz se comporta algumas vezes como partícula. Historicamente se pensava que o elétron, por exemplo, se comportasse como uma partícula, até que se descobriu que, em muitos aspectos, ele se comporta como uma onda. De fato, ele não se comporta nem como uma coisa nem como outra.

No entanto, elétrons também se comportam como a luz e o comportamento dos objetos atômicos (sejam eles elétrons, prótons, nêutrons, fótons,...) é similar, exibindo ora comportamento ondulatório, ora comportamento corpuscular. Todos eles são "partículas-onda", de modo que aquilo que nós aprendermos sobre as propriedades dos elétrons (que vamos examinar detalhadamente aqui), também se aplica às demais "partículas", incluindo fótons de luz.

Durante o primeiro quarto do século passado (XX), o acúmulo gradual de informações acerca do comportamento atômico e em pequena escala, trouxeram os primeiros indícios de como os

pequenos objetos se comportam e acabaram por gerar uma dificuldade crescente na sua modelização, que só foi resolvida nos anos de 1926-27 por Schrödinger, Heisenberg e Bohr, ao descreveram de modo consistente o comportamento dos objetos quânticos. O comportamento dos objetos em escala atômica é tão diferente do usual, que todos têm dificuldade de se habituar ao mesmo, sejam leigos ou físicos experientes. Mesmo os especialistas não entendem o mundo quântico da forma como gostariam, e isto é perfeitamente razoável, já que toda experiência e intuição humanas se aplicam a objetos grandes. Sabemos como os objetos grandes se comportam, mas as coisas em escala muito pequena não se comportam de modo similar e, assim, no universo da quântica as coisas têm que ser aprendidas de maneira exclusivamente abstrata ou imaginativa, sem qualquer conexão com nossa experiência direta. Neste texto abordaremos esse estranho e misterioso comportamento.

Escolhemos examinar um fenômeno que é impossível, absolutamente impossível, de ser explicado por meio de qualquer forma clássica e que comporta a essência da mecânica quântica. Esse fenômeno comporta, de fato, o *único* mistério da mecânica quântica. Não é possível compreender "por que" o fenômeno ocorre, mas apenas e tão somente *como* ele sucede. Contando como ele ocorre teremos abordado as peculiaridades básicas de toda mecânica quântica.

1.2 Um experimento com projéteis

Para tentar entender o comportamento quântico dos elétrons, vamos confrontá-lo com o comportamento de partículas mais familiares, tais como os projéteis de uma metralhadora, e com o comportamento de um sistema ondulatório, tal como ondas na superfície da água. Consideremos inicialmente o comportamento dos projéteis em um dispositivo experimental como aquele mostrado esquematicamente na Fig.1-1. O arranjo mostra uma metralhadora que dispara continuamente projéteis de modo aleatório, tal que eles se dispersam em uma ampla faixa angular, como mostrado na figura. Frontal à metralhadora há uma parede blindada e com duas fendas verticais, largas o suficiente para permitir a passagem de um projétil. Para além da parede, há um anteparo (por exemplo: uma grossa parede de madeira) que *absorve* os projéteis incidentes. Sobre o anteparo há um "detector" de projéteis, que pode ser uma caixa contendo areia. Qualquer projétil que penetre no detector será detido e acumulado. A qualquer tempo a caixa pode ser esvaziada e os projéteis acumulados em seu interior, podem ser contados. O detector pode mover-se para cima e para baixo (que no nosso caso será a direção x). Com este arranjo podemos encontrar experimentalmente a resposta à seguinte pergunta: *"Qual é a*

probabilidade de que um projétil que atravesse as fendas e chegue ao anteparo a uma posição x do centro do arranjo?". Em primeiro lugar, devemos nos dar conta de que estamos falando em probabilidade, já que não é possível dizer definitivamente onde irá incidir algum projétil particular. O projétil que casualmente atinge uma das fendas pode ricochetear pelas bordas e terminar em qualquer parte. Entendemos por "probabilidade" a chance de que algum projétil atinja o detector, o que pode ser medido pelo número deles que é capturado na caixa de areia por unidade de tempo, dividido pelo número total de projéteis que colide com o anteparo de madeira. Se assumirmos que a metralhadora dispara sempre com a mesma taxa de repetição durante as medidas, a probabilidade que queremos é simplesmente proporcional ao número de projéteis que alcança o detector em um intervalo de tempo padrão.

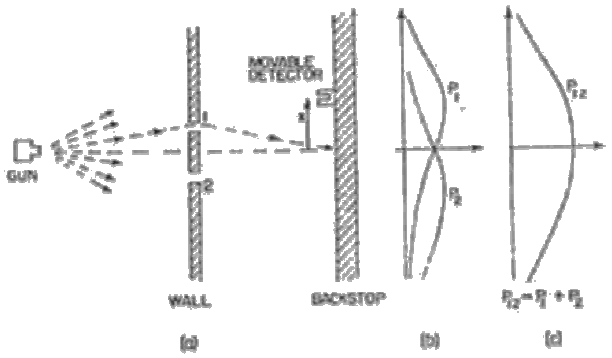


Fig. 1-1 Experimento de interferência com projéteis

Para nossos propósitos, é interessante imaginar um experimento ideal, no qual os projéteis não sejam reais, mas projéteis *indestrutíveis* - (não podem ser fragmentados). Neste caso, constatamos que eles sempre chegam íntegros no detector. Se a taxa com a qual a metralhadora dispara for muito baixa, pode ser que em algum dado momento não chegue nenhum, ou talvez um e somente um – exatamente um – projétil no anteparo. Também o tamanho dos projéteis certamente não depende da taxa de disparo da arma. Resumindo: "*Projéteis sempre chegam ao detector idênticos e inteiros*". O que se mede no detector é a probabilidade de chegada de um projétil como função da posição *x*. O resultado que podemos imaginar a partir de medidas com esse dispositivo está representado na parte c da Fig. 1-1. Na figura, o deslocamento do detector é paralelo ao eixo *x* e se move verticalmente. Conforme descrito anteriormente, a probabilidade de chegada de um projétil sobre o anteparo em uma posição qualquer sobre o eixo *x* é proporcional ao número de projéteis que alcança o detector e, na figura, esta

probabilidade está representada por P_{12}, uma vez que os projéteis podem ter vindos tanto da fenda 1 quanto da fenda 2.

Por que será que P_{12} tem seu máximo em $x = 0$ e não exatamente na frente das fendas 1 e 2 respectivamente?

Podemos entender esse fato se fizermos novamente nosso experimento, depois de cobrir a fenda 2, e repetindo o experimento, desta vez cobrindo a fenda 1. Quando a fenda 2 está coberta, os projéteis podem passar somente através da fenda 1, e obteremos a curva indicada por P_1 na parte (b) da figura. Como era de se esperar, o máximo de P_1 ocorre para o valor de x que está em linha reta com a metralhadora e a fenda 1. Quando a fenda 1 está fechada, conseguimos a curva simétrica P_2 indicada na figura, que é a distribuição de probabilidade para os projéteis que passam através da fenda 2. Comparando as partes (b) e (c) da Fig. 1-1, encontramos o importante resultado que:

$$P_{12} = P_1 + P_2 \qquad (1.1)$$

As probabilidades simplesmente se somam. O efeito com ambas as fendas abertas é a soma dos efeitos com cada fenda aberta separadamente. Chamaremos este resultado uma observação de "não interferência", por uma razão que será explicada mais tarde. Conclusão importante até o momento. "Projéteis chegam a unidades inteiras e sua probabilidade de chegada é uma somatória simples das curvas P_1 e P_2, não exibindo padrão de interferência."

1.3 Um experimento com ondas

Consideramos agora um experimento com ondas na água. O dispositivo é mostrado esquematicamente na Fig. 1-2. Temos um recipiente pouco profundo com água. Um pequeno gerador de "ondas" está vibrando para cima e para baixo, por meio de um motor e produz ondas circulares. À direita da fonte há novamente uma parede com duas fendas e, além dela, há uma segunda parede, que atua como "absorvedor" de ondas, de maneira que não há reflexão das ondas que nela chegam. Na frente da parede há um detector de ondas, que pode ser movido ao longo da direção x, como antes. O detector é agora um dispositivo que mede a "intensidade" do movimento ondulatório. Imaginemos que o detector mede a altura do movimento ondulatório, mas sua escala é calibrada em proporção ao quadrado da altura real. Deste modo a leitura é proporcional à intensidade da onda e, por extensão, proporcional à energia transportada pela onda.

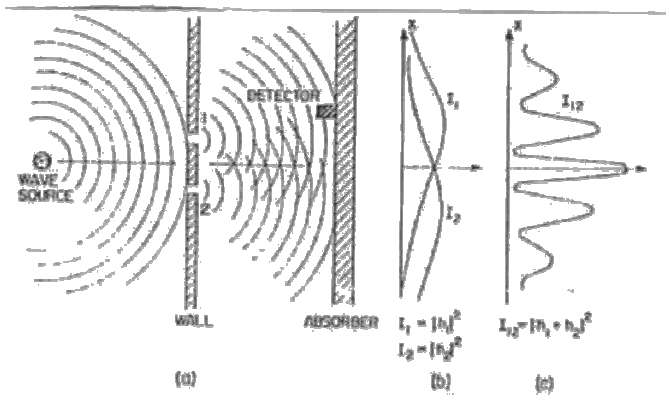


Fig.1-2 Experimento de interferência com ondas de água

Com o aparato de ondas, a primeira coisa que se observa é que a intensidade pode ter *qualquer* valor. Se a amplitude de oscilação da fonte for muito pequena, então, apenas um pequeno movimento ondulatório chega ao detector. Quando a amplitude da fonte aumenta, registra-se maior intensidade no detector. A intensidade da onda pode ter qualquer valor e não algum valor inteiro, isto é, não diríamos que há alguma "corpuscularidade" na intensidade da onda.

Agora medimos a intensidade da onda para vários valores de x (cuidando para que a fonte de onda funcione sempre da mesma forma). A curva obtida tem o aspecto mostrado por I_{12} na parte (c) da figura. Vejamos porque a intensidade tem esse aspecto, bastante diferente de P_{12}.
Se cobrirmos uma fenda por um instante e medirmos a distribuição da intensidade no absorvedor, encontraremos as curvas de intensidade mais simples mostradas na parte (b) da

Fig., tal que I_1 é a intensidade da onda da fenda 1 (que encontramos fazendo as medições quando a fenda 2 está fechada) e I_2 é a intensidade da onda proveniente da fenda 2 (visto quando a fenda 1 está bloqueada).

A intensidade I_{12}, observada quando ambas as fendas estão abertas, certamente não é a soma de I_1 e I_2. Dizemos que há "interferência" das duas ondas. Em alguns lugares (onde a curva I_{12} tem seus máximos) as ondas estão "em fase" e os máximos das ondas se somam para dar uma amplitude maior e, portanto, uma intensidade maior. Dizemos que as duas ondas estão "interferindo construtivamente" em tais lugares. A interferência será construtiva sempre que a diferença entre as distâncias do detector a uma das fendas e do detector até a outra fenda corresponder a um número inteiro de comprimentos de onda.

Nos locais aonde as duas ondas chegam ao detector com diferença de fase igual a π, elas estarão completamente "fora de fase" e o movimento ondulatório resultante no detector será a diferença entre as duas amplitudes. Neste caso, as ondas "interferem destrutivamente". Obtemos no detector um valor baixo para a intensidade da onda. Esperamos tais valores sempre que a distância entre a fenda 1 e o detector seja diferente da distância entre fenda 2 e detector por um número ímpar de meias ondas. Os valores mínimos de I_{12} na Fig. 1-2 correspondem aos lugares onde as duas ondas interferem destrutivamente.

A relação quantitativa entre I_1, I_2 e I_{12} pode ser expressa da seguinte forma: A altura instantânea da onda proveniente da fenda 1 pode ser escrita como (a parte real de) $h_1 e^{i\omega t}$ onde a "amplitude" h_1 é, em geral, um número complexo. A intensidade é proporcional ao quadrado médio da altura, ou, quando usamos números complexos, o quadrado do valor absoluto $|h_1|^2$. Similarmente para a fenda 2, a altura é $h_2 e^{i\omega t}$ e a intensidade é proporcional a $|h_2|^2$. Quando ambas as fendas estão abertas, as alturas se somam para dar a altura resultante ($h_1 + h_2$) e $e^{i\omega t}$ e intensidade $|h_1 + h_2|^2$. Omitindo a constante de proporcionalidade, as relações apropriadas para as ondas que interferem são:

$$I_1 = |h_1|^2, \quad I_2 = |h_2|^2, \quad I_{12} = |h_1 + h_2|^2 \qquad (1.2)$$

Vale notar que o resultado obtido é bastante diferente daquele obtido com projéteis. (Eq. 1-1). Se expandimos $|h_1 + h_2|^2$ vemos que:

$$|h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2| \cos\delta, \qquad (1.3)$$

onde δ e a diferença de fase entre h_1 e h_2. Em termos das intensidades, poderíamos escrever:

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta \qquad (1.4)$$

O último termo em (1.4) é o "termo interferência". Deixemos nossa abordagem do comportamento das ondas por enquanto por aqui. As conclusões importantes para o experimento com ondas na água são: a intensidade lida no detector pode ter qualquer valor (e não necessariamente um valor inteiro) e, ainda, ocorre interferência.

1.4 Um experimento com elétrons

Imaginemos agora um experimento similar àqueles já abordados, mas agora com elétrons, como mostrado esquematicamente na Fig. 1-3. A fonte de elétrons é constituída por um filamento de tungstênio aquecido pela passagem de uma corrente elétrica. O filamento é envolvido por uma caixa metálica com uma abertura frontal ao arranjo das fendas. Aplicando-se um potencial positivo na caixa, elétrons serão emitidos pelo filamento e alguns deles escaparão pela abertura, alcançando o arranjo das fendas. Do mesmo modo que nas situações anteriores, os elétrons podem alcançar um detector móvel colocado em um anteparo à direita das fendas. Neste caso, o detector pode ser uma fotomultiplicadora conectada a um alto-falante.

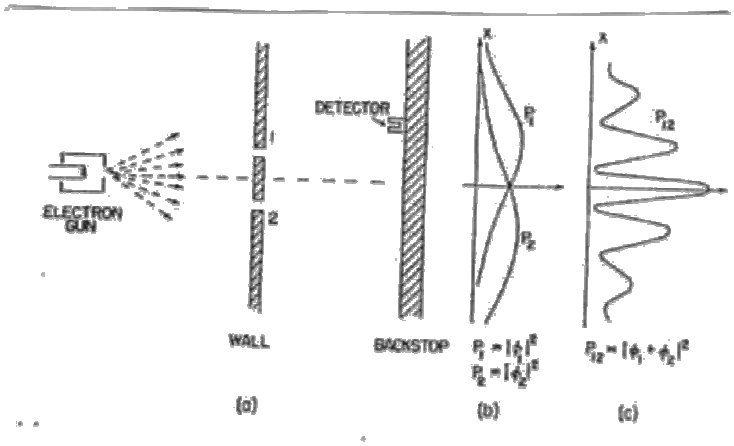


Figura 1-3 Experimento de interferência com elétrons.

Vale comentar que o experimento com elétrons não foi feito exatamente desta forma. Estamos lidando com um tipo especial de experimento, chamado de "experimento *antecipatório* de pensamento". Tais tipos de experimentos são conduzidos em nossa imaginação e é possível conhecer os resultados que seriam obtidos destes experimentos a partir de muitos outros que foram efetivamente executados em escala e proporção tais que acabam por exibir os efeitos que serão aqui descritos.

Em nosso arranjo experimental, cada elétron que colide com o detector provoca um pequeno ruído (clic) que é amplificado e tornado audível pelo alto-falante. Vale notar que a cada elétron corresponde um "clic" e que todos os "clics" são idênticos, não havendo frações menores, por exemplo, "meio clic". Os clics também são produzidos de modo mais ou menos errático, de modo que o ruído gerado é mais ou menos similar

àquele de um rádio fora de sintonia. No entanto, é possível falar em uma taxa média na qual os "clics" são ouvidos (por exemplo, tantos "clics" por minuto, em média).

Na medida em que o detector é movimentado, a freqüência com que os clics aparecem é maior ou menor, mas a altura (sonoridade) de cada "clic" é sempre a mesma. Se abaixarmos a temperatura do filamento emissor, a freqüência dos "clics" diminui, mas ainda assim, cada "clic" soa da mesma forma. Também podemos notar que se colocássemos dois detectores separados no anteparo, um ou outro clicaria, mas nunca ambos ao mesmo tempo (exceto que, caso fossem ouvidos dois clics num tempo muito próximo, nosso ouvido não poderia percebê-los como separados). Concluímos portanto que, de onde quer que cheguem ao anteparo, os elétrons (causadores de clics) chegam como unidades inteiras. Todos são do mesmo tamanho, isto é, somente chegam elétrons inteiros, e chegam um a um no anteparo, cada um causando um "clic", idêntico a qualquer outro. Podemos concluir que *"os elétrons sempre chegam ao detector como entidades inteiras e unitárias"*.

De modo similar ao experimento com projéteis, procuremos encontrar experimentalmente a resposta à seguinte pergunta: Qual é a probabilidade relativa de que um elétron chegue ao anteparo em diversas posições x, do centro do arranjo? Como visto anteriormente, podemos obter tal probabilidade observando a freqüência dos clics, desde que mantenhamos constante o regime de funcionamento do filamento. A probabilidade com a qual os elétrons chegam a uma posição x particular é proporcional à freqüência média dos clics nessa posição x.

O resultado do experimento é uma curva surpreendente, indicada por P_{12} na parte (c) da Fig. 1-3. Esta é a forma como os elétrons se comportam!!!

1.5 A interferência com ondas de elétrons

Tratemos de analisar a curva da Fig. 1-3 para ver se podemos entender o comportamento dos elétrons. A primeira coisa que poderíamos dizer é que para alcançar o detector eles devem passar através *ou da fenda 1 ou da fenda 2*. Tal hipótese pode ser colocada na forma de uma "proposição".

Proposição A: Cada elétron passa, ***necessariamente****, ou através da fenda 1 ou através da fenda 2.*

Supondo verdadeira a Proposição A, todos os elétrons que chegam ao anteparo podem ser divididos em duas classes: (1) aqueles que chegam através da fenda 1, e (2) aqueles que chegam através da fenda 2. Então a curva observada deve ser a soma dos efeitos dos elétrons que passam através da fenda 1 e dos elétrons que passam através da fenda 2. Vamos checar essa hipótese mediante um experimento. Primeiro, realizamos uma medida para os elétrons que passam através da fenda 1, bloqueando a fenda 2 e executando a contagem dos clics no detector. Da freqüência destes clics obtemos P_1. O resultado da medida é mostrado pela curva P_1 indicada na parte (b) da Fig. 1-3. O resultado parece bastante razoável. De maneira similar medimos P_2, a distribuição de probabilidades para os elétrons que passam através da fenda 2, mantendo a fenda 1 fechada. O resultado desta medida está também indicado na figura.

O resultado P_{12} obtido com ambas as fendas abertas, claramente **não é** a soma de P_1 e P_2, as probabilidades para cada fenda separada. Por analogia, com nosso experimento de ondas de água, pode-se afirmar que há interferência no experimento com elétrons. Vamos enfatizar esse resultado: *"Há interferência no experimento com elétrons"*.

Para os elétrons: $P_{12} \neq P_1 + P_2$.

Como seria possível ocorrer interferência num experimento com partículas inteiras (os elétrons que causam os "clics"?).

Se recordarmos o experimento de interferência com ondas, vamos observar que surgem frentes de onda esférica simultâneas nas duas fendas e a interferência ocorre pela sobreposição das ondas vindas *das duas fendas*. Ora, se elétrons atravessam ou uma fenda ou outra fenda, não deveria haver interferência!

Procuremos imaginar algumas hipóteses para que o efeito de interferência ocorra.

1- Talvez o elétron se fragmente em dois e uma parte dele passe pela fenda 1 e a outra pela fenda 2.

2- Talvez ele passe pela primeira fenda, retorne e passe pela segunda fenda, segundo algum mecanismo desconhecido.

A primeira hipótese acima é inviável, pois não há energia disponível para fragmentar elétrons e, ainda por cima, sempre ouvimos no detector um "clic" inteiro, e não "meio-clic" decorrente da presença de "meio elétron" no detector.

Consideremos então a segunda hipótese. Devemos notar na Fig. 1.3c que existem alguns pontos de mínimo na curva de interferência, que correspondem à chegada de *poucos elétrons* mesmo com as duas fendas abertas. Nestes pontos, curiosamente, chegam *mais* elétrons quando uma das fendas está fechada, isto é, *fechando* uma das fendas, *aumentamos* o número de elétrons provenientes da *outra fenda*. Repare que os mínimos da curva P_{12} desaparecem quando uma das fendas é fechada (Fig. 1-3b). Consideremos, no entanto a região central de incidência dos elétrons. A Fig. 1-3c mostra que P_{12} é mais do que o dobro de P_1+P_2, o que significa dizer que, neste ponto, fechando uma das fendas, *diminuímos* o número de elétrons provenientes da outra fenda...

Como resolver este paradoxo?

A tarefa não é simples e muitas idéias têm sido tentadas para explicar a formação da curva P_{12} em termos de partículas individuais, sem que nenhuma delas tenha alcançado sucesso.

No entanto, a matemática necessária para relacionar P_1 e P_2 com P_{12} é surpreendentemente simples. A curva P_{12} é similar àquela do experimento com ondas (curva I_{12}). A explicação no caso das ondas foi simples, pois se baseou no movimento ondulatório e na possibilidade da variação contínua das intensidades. O que ocorre no anteparo pode ser descrito em termos de dois números complexos ϕ_1 e ϕ_2 (que são função de x). O valor absoluto de ϕ_1 descreve o que ocorre somente quando a fenda 1 está aberta, isto é, $P_1 = |\phi_1|^2$, enquanto que somente com a fenda 2 aberta temos $P_2 = |\phi_2|^2$. O efeito combinado das duas fendas será $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$, exatamente como ocorre para fenômenos ondulatórios.

A partir do que foi dito acima, concluímos o seguinte: os elétrons chegam como partículas e sua probabilidade de chegada tem distribuição similar à distribuição de intensidade de uma onda. Neste sentido é que os elétrons se comportam *"algumas vezes como partículas, algumas vezes como ondas"*.

Concluímos com o discurso acima e com o perfil de curva obtido em 1.3c (P_{12}), que o número de elétrons que alcança o detector em um ponto qualquer *não é* dado pela soma do número de elétrons que chegam pela fenda 1 mais o número de elétrons que chega pela fenda 2. Consequentemente temos que concluir que, afinal, a proposição A é falsa, ou seja *não é verdade* que os elétrons passam *ou* através da fenda 1 *ou* através da

fenda 2! Por onde afinal de contas, passam os elétrons? Procuremos testar a Proposição A por meio de outro experimento.

1.6 Observando os elétrons

A fim de determinar se os elétrons passam pela fenda 1 ou pela fenda 2, vamos procurar observá-los. Podemos tentar fazer isso colocando atrás das fendas uma fonte luminosa muito intensa (uma lâmpada), pois cargas elétricas (elétrons) têm a capacidade de espalhar luz (Fig. 1-4). Deste modo, quando um elétron passar pela fonte a caminho do detector, ele espalhará luz até nossos olhos (causará um pequeno flash de luz) e poderemos assim localizá-lo. Se porventura um elétron tomar a trajetória da fenda 2 esquematizada na Fig. 1-4, veremos um flash de luz vindo das proximidades do lugar marcado A, na figura. Se o elétron passar através da fenda 1, veremos um flash vindo de suas proximidades. Vejamos o que ocorre no experimento.

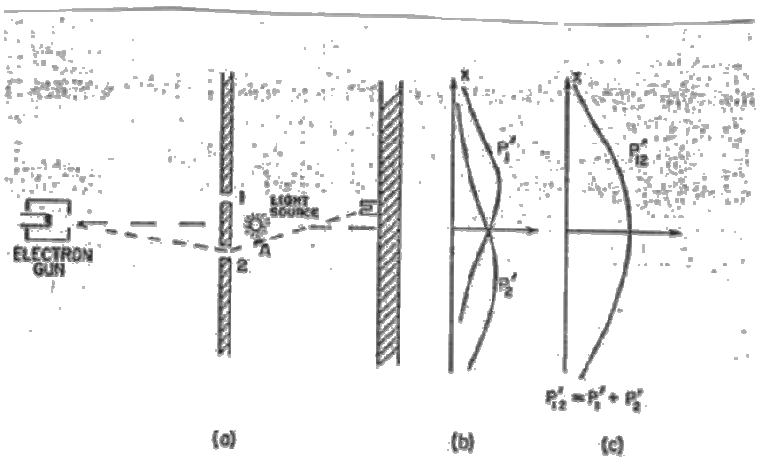


Figura 1.4 Um experimento diferente com elétrons.

O resultado observado é o seguinte: cada vez que escutamos um "clic" no detector de elétrons, vemos também um flash de luz, ou próximo da fenda 1 ou próximo da fenda 2, mas nunca ambos simultaneamente, independentemente de onde coloquemos o detector. Desta observação concluímos que, se observarmos os elétrons, encontraremos que eles passam *ou* através de uma fenda *ou* através de outra. Experimentalmente, a Proposição A é necessariamente verdadeira e os resultados negam nosso argumento contra a Proposição A!

Por que P_{12} não é simplesmente igual a P_1+P_2? Voltemos ao experimento! Sigamos a pista dos elétrons e averigüemos como eles se comportam. Para cada posição

x do detector, contaremos os elétrons que chegam e também tomaremos nota através de qual fenda passaram, observando os flashes de luz. Podemos proceder da seguinte maneira: façamos uma tabela e, sempre que ouvimos um "clic", marcaremos na Coluna 1 se virmos um flash perto da fenda 1, e marcaremos coluna 2 se o clic corresponder a um flash vindo da fenda 2. Cada elétron que chega é registrado em uma das duas classes: os que passam através de 1 e os que passam através de 2. A partir do número registrado na Coluna 1, obteremos a probabilidade P'_1 de que um elétron chegue ao detector via fenda 1, e a partir do número registrado na Coluna 2, obteremos P'_2, a probabilidade de que um elétron chegue ao detector via fenda 2. Se agora repetirmos o procedimento para diversos valores de x, obteremos as curvas para P'_1 e P'_2 mostradas na parte (b) da Fig. 1-4.

O resultado está longe de ser surpreendente. Obtivemos para P'_1 algo muito similar ao que antes havíamos obtido para P_1 bloqueando a fenda 2, e P'_2 similar ao que havíamos obtido (P_2) fechando a fenda 1. Não há nenhuma complicação na interpretação deste resultado. Quando nós os observamos, os elétrons atravessam o sistema de fendas exatamente como nós esperamos que eles atravessem. Independentemente de uma das fendas estar aberta ou fechada, os elétrons que nós detectamos como vindos pela fenda 1 se distribuem (curva P'_1), do mesmo modo estando a fenda 2 aberta ou fechada. Da mesma maneira, o resultado para a fenda 2 (P'_2) é similar àquele obtido em P_2, independentemente de a fenda 1 estar aberta ou fechada.

Essencialmente, para obter a probabilidade total basta somar os valores das colunas, isto é, $P'_{12} = P'_1 + P'_2$.

Não obstante pudéssemos ver através de qual fenda passam os elétrons, não obtivemos mais a antiga curva de interferência P_{12}, mas uma nova, P'_{12}, que não mostra a interferência! Surpreendentemente, se apagarmos a luz, o padrão de interferência se restabelece e voltamos a obter P_{12}.

Concluímos que, *quando observamos os elétrons, a distribuição sobre o anteparo é diferente de quando não os observamos*. Como explicar um resultado tão inesperado, que depende de nossa observação? Talvez seja o fato de ligarmos a lâmpada. Pode ser que os elétrons, sendo muito pequenos e leves, tenham sua trajetória desviada no momento em que espalham a luz, já que o campo elétrico desta exerce força sobre cargas elétricas. Assim, não seria surpreendente que seu movimento mudasse. De fato, a luz exerce forte influência sobre os elétrons e, ao tentar observá-los, desviamos sua

trajetória. Tal desvio poderia, de alguma forma, destruir o padrão de interferência exibido pelos mesmos.

Como contornar esta situação? Uma possibilidade seria diminuir a intensidade luminosa. As ondas luminosas são mais "fracas" e devem perturbar menos o movimento dos elétrons.

Certamente, tornando a luz mais e mais fraca, ela finalmente será fraca o suficiente para não perturbar os elétrons. Vamos tentar. A primeira coisa que observamos é que os flashes de luz dispersos pelos elétrons, à medida que passam não são mais fracos. *Sempre são flashes de mesma intensidade*. A única coisa que acontece quando a luz se faz mais fraca é que algumas vezes escutamos um "clic" do detector, mas não vemos nenhum flash. O elétron passa sem ser "visto". O que constatamos é que a luz também atua, neste experimento, como os elétrons. Sabíamos que ela tinha natureza ondulatória, mas agora a vemos comportar-se como partícula, pois estamos tentando observar a colisão entre elétrons e partículas de luz. A luz é espalhada como partículas, chamadas de "fótons". Conforme diminuímos a intensidade da fonte de luz, nós não diminuímos a intensidade dos fótons, isto é, eles não ficam mais fracos, mas apenas diminuímos a taxa com que eles são emitidos (menos fótons são emitidos por unidade de tempo). Isso explica porque, quando a intensidade da fonte é diminuída, alguns elétrons passam sem serem percebidos. Ocorreu que não havia fótons por perto quando o elétron passou.

Parece que estamos num beco sem saída. Se de fato sempre que "vemos" o elétron, vemos um flash de mesma intensidade, então os elétrons que vemos são sempre os perturbados; os que não perturbamos, não vemos! Continuemos de todo o modo a lidar com o experimento de luz fraca. A partir de agora, sempre que escutarmos um clic no detector, registraremos as observações em três colunas: na Coluna (1) os elétrons vistos pela fenda 1, na Coluna (2) os elétrons vistos pela fenda 2 e na Coluna (3), os elétrons não vistos. Quando elaboramos nossos dados e calculamos as probabilidades, encontramos o seguinte resultado: Aqueles "vistos na fenda 1" têm uma distribuição como P'_1; aqueles "vistos na fenda 2", têm uma distribuição como P'_2; (de modo que os vistos tanto pela fenda 1 como pela fenda 2" têm uma distribuição como P'_{12}); e aqueles "não vistos" têm uma distribuição "ondulante" exatamente como P_{12} da Fig. 1-3! *Isto é, se os elétrons não são vistos, eles exibem interferência!*

É possível compreender o que ocorreu. Quando não vemos o elétron, nenhum fóton o perturba e, quando o vemos, um fóton o perturbou. Há sempre a mesma quantidade de perturbação, porque os fótons de luz produzem, todos eles, efeitos de mesma intensidade e o efeito dos fótons dispersados é suficiente para borrar qualquer efeito de interferência.

Existiria alguma maneira pela qual pudéssemos ver os elétrons sem perturbá-los? Aprendemos na disciplina de Quântica que o momento transportado por um fóton é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda ($p=h/\lambda$). Certamente a sacudida dada ao elétron quando o fóton é espalhado até nossos olhos depende do momento que o fóton transporta. Assim, se queremos reduzir a perturbação sobre os elétrons, temos que diminuir a *freqüência* (ou aumentar o comprimento de onda) da luz e não reduzir sua intensidade.

Usemos então uma luz de cor mais vermelha. Poderíamos ainda usar luz infravermelha, ou ondas de rádio (como o radar), e "ver" onde foi o elétron, com a ajuda de algum equipamento que possa "ver" luz destes comprimentos de onda maiores. Se usarmos luz menos energética talvez possamos evitar perturbar tanto os elétrons.

Tratemos o experimento com ondas maiores. Continuaremos repetindo nosso experimento, usando luz de comprimento de onda cada vez maior (e portanto menor energia, ou menor momento). No começo, nada parece mudar. Os resultados são os mesmos. Então ocorre uma coisa terrível! Quando o comprimento de onda se torna maior do que a distância entre as fendas, alcançamos uma espécie de limiar de perturbação. Vemos um flash indistinto quando a luz é dispersada pelos elétrons. Não podemos dizer mais através de qual fenda o elétron passou. Só sabemos que foi em alguma parte! E é exatamente com luz deste λ que as perturbações nos elétrons são suficientemente pequenas para que P'_{12} comece a se parecer com P_{12} – e passamos a obter algum efeito de interferência. Isto é, somente para comprimentos de onda muito maior do que a separação das duas fendas (*quando não temos chance alguma de dizer por onde passou o elétron*) que a perturbação devida à luz se torna suficientemente pequena para que obtenhamos a curva P_{12} mostrada na Fig. 1-3.

No nosso experimento descobrimos ser impossível usar a luz para se determinar por qual fenda passou o elétron e, ao mesmo tempo, não perturbar o padrão obtido. A partir desta constatação, Heisenberg sugeriu que as então novas leis da natureza só

poderiam ser consistentes se existisse alguma limitação básica em nossa capacidade experimental, não reconhecida até aquele momento. Ele propôs, como um princípio geral, o *princípio da incerteza*, que podemos enunciar, em termos deste experimento, como segue:

> "É impossível projetar um dispositivo para determinar através de qual fenda passa o elétron, que não perturbe ao mesmo tempo os elétrons o suficiente para destruir o padrão de interferência".

Se um dispositivo é capaz de determinar através de qual fenda vai passar o elétron, *ele não pode ser tão sutil* que não perturbe o padrão de uma maneira essencial. Ninguém jamais encontrou um modo de se contornar o princípio da incerteza e, assim, devemos supor que ele descreve uma característica básica da natureza.

A teoria completa da mecânica quântica que agora usamos para estudar os átomos e, de fato, toda matéria, depende da validade deste princípio. Sendo a mecânica quântica uma teoria de tanto êxito, a confiança no princípio da incerteza é reforçada. Mas se uma forma de "superar" o princípio da incerteza for algum dia descoberta, a mecânica quântica dará resultados incompatíveis, e terá que ser descartada como uma teoria válida da natureza.

Afinal, o que se passa com a Proposição A? É verdade ou não é verdade que cada elétron passa, seja pela fenda 1, seja pela fenda 2? A única resposta que pode ser dada a esta questão é que descobrimos que devemos pensar o experimento de modo diferenciado, para não cairmos em contradição. O que se deve dizer para evitar previsões erradas é o seguinte: se observarmos as fendas ou, mais precisamente, se temos um artefato capaz de determinar se os elétrons passam através da fenda 1 ou da fenda 2, então podemos dizer que de fato eles vêm das fendas 1 ou 2. No entanto, quando *não tentamos* observar de onde vêm os elétrons, isto é, quando *não há* no experimento um artefato que perturbe os elétrons, então não podemos afirmar que eles passam ou através da fenda 1 ou através da fenda 2. É sobre esta corda bamba que devemos caminhar se desejamos descrever com êxito a natureza.

O experimento mostra, afinal, que o movimento de toda matéria – assim como o dos elétrons - deve ser descrito em termos de ondas. Como fica então o movimento dos projéteis do primeiro experimento? Por que não vemos ali um padrão de interferência? Para os projéteis, os comprimentos de onda são tão minúsculos que os picos de

interferência tornam-se muito estreitos. Tão estreitos que qualquer detector, por menor que seja, não pode distinguir os máximos e mínimos separados. O que observamos é somente uma espécie de valor médio, que é a curva clássica da dispersão. Na Fig. 1-5 indicamos esquematicamente o que acontece com objetos macroscópicos. A parte (a) da figura mostra a distribuição de probabilidade prevista para os projéteis, usando a mecânica quântica. As rápidas oscilações representam o padrão de interferência que se obtém para ondas de comprimento de ondas muito curto. Qualquer detector físico não acompanharia as rápidas oscilações da curva de probabilidade, de maneira que as medições mostram a curva suave desenhada na parte (b) da figura.

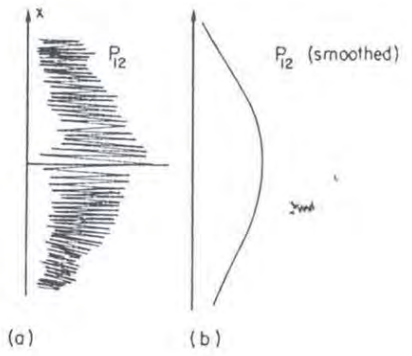


Fig. 1.5. Figura de interferência com projéteis: (a) real (esquemática). (b) observada.

1.7 Primeiros Princípios da Mecânica Quântica

Façamos agora um resumo das principais conclusões obtidas dos experimentos, apresentando os resultados de modo que eles sejam válidos, de modo geral, para uma classe de experimentos.

Antes de qualquer coisa, vamos definir um "experimento ideal" como sendo aquele livre de influências externas ou que pelo menos tenhamos controle de todas as variáveis. De modo geral, podemos afirmar que um "experimento ideal é aquele em que todas as condições iniciais e finais estão completamente especificadas". Chamaremos de "evento" um conjunto inicial e final de condições, como por exemplo: "um elétron

abandona o filamento, alcança o detector e nada mais acontece". Vejamos agora nosso resumo:

RESUMO

(1) A probabilidade de ocorrência de um evento em um experimento ideal é dada pelo quadrado do valor absoluto de um número complexo ϕ, o que é chamado de "amplitude de probabilidade".

P = probabilidade,

ϕ = amplitude de probabilidade, então,

$P = |\phi|^2$

(2) Quando um evento pode ocorrer de diversas maneiras alternativas, a amplitude de probabilidade para o evento é a soma das amplitudes de probabilidade para cada maneira considerada separadamente. Ocorre interferência:

$\phi = \phi_1 + \phi_2$ mas, $P = |\phi|^2$ portanto,

$P = |\phi_1 + \phi_2|^2$

(3) Se um experimento é executado de tal modo que ele seja capaz de determinar se uma ou outra alternativa é a que realmente ocorre, então a probabilidade de ocorrência do evento é a soma das probabilidades de cada alternativa e a interferência é perdida.

$P = P_1 + P_2$

A proposição (3) acima claramente indica que *é o experimento que vai determinar o comportamento ondulatório ou corpuscular dos elétrons!*

É o caso de se perguntar: como isto pode ocorrer? O que está por trás dessa correlação experimento *versus* resultado?

Não há resposta para estas questões. Não podemos alcançar princípios mais básicos ou fundamentais que nos permitam deduzir estes resultados.

Vamos enfatizar uma diferença muito importante entre mecânica clássica e mecânica quântica. Discutimos as probabilidades de como os elétrons se comportam numa dada circunstância. Concluímos que com nosso dispositivo experimental (ou qualquer outro melhor do que ele), é impossível de se prever *exatamente* o que vai

acontecer. Dito de outra forma, a Física desistiu de tentar predizer *exatamente* o que vai ocorrer numa dada circunstância. A Física *desistiu*: não podemos prever com certeza. O máximo que podemos fazer é estabelecer a *probabilidade* da ocorrência de eventos diferentes.

Deve-se reconhecer que isto é uma retração em nosso ideal anterior de plena compreensão da natureza. Isto pode ser um passo para trás, mas não se encontrou ainda nenhuma forma de se evitá-lo.

Façamos, no entanto, uma última tentativa para resolver a situação. Talvez o elétron tenha algum tipo de capacidade interna – algumas variáveis internas – que não conhecemos ainda e que possam determinar os resultados obtidos acima e que nos impeçam de predizer que evento vai ocorrer. Talvez, se pudéssemos observar mais de perto o elétron, seríamos capazes de dizer onde ele iria parar. Até onde sabemos, isso é impossível e, ainda assim, teríamos dificuldades. Suponhamos que no interior do elétron haja certo tipo de mecanismo que determine onde ele irá parar. Este mecanismo deve determinar *também* através de qual fenda ele passará em sua trajetória. Mas não devemos esquecer que o que está dentro do elétron não deveria depender do que *nós* fazemos em particular, se abrimos ou fechamos uma das fendas. Dessa forma se um elétron, antes de abandonar o filamento, já decidiu: *(a)*qual fenda irá usar e *(b)*em que posição do anteparo irá parar, encontraríamos P_1 para os elétrons que escolheram a fenda 1, P_2 para os que escolheram a fenda 2 e, necessariamente, a soma P_1+P_2 para a condição de duas fendas abertas. Parece não haver alternativa além destas. Experimentalmente verificamos que este não é o caso. Não vislumbramos uma saída para este mistério, de maneira que até o momento temos que nos contentar em calcular probabilidades. Dizemos "até o momento", mas há fortes suspeitas de que esta situação é algo que estará conosco para sempre – que é impossível resolver este mistério – de que é assim que a natureza é.

1.8 O princípio da incerteza

Originalmente, Heisenberg enunciou o princípio da incerteza da seguinte forma: se medirmos o movimento de qualquer objeto e determinarmos a componente na direção x de seu momento com uma incerteza Δp, não podemos conhecer ao mesmos tempo, sua posição x com precisão maior que $\Delta x=h/\Delta p$, na qual h é uma constante natural, chamada constante de Planck, e vale, aproximadamente $6{,}62 \times 10^{-34}$ Joule.segundo. As incertezas

na posição e momento do objeto (por exemplo, partícula) em qualquer instante devem ter seu produto maior que a constante de Planck. Este é um caso especial do princípio da incerteza, que foi enunciado anteriormente com mais generalidade. O enunciado mais geral foi que, de nenhum modo pode-se desenhar um equipamento que determine qual das duas alternativas deve ser tomada, sem que ao mesmo tempo se destrua o padrão de interferência.

Demonstraremos, para nosso caso em particular, que o tipo de relação dada por Heisenberg deve ser verdadeiro. Imaginemos uma modificação do experimento da Fig. 1-3, na qual a parede com as fendas consista em uma lâmina montada sobre rodas, de modo que ela possa mover-se livremente para cima e para baixo (na direção x), como mostrado na Fig. 1-6. Observando cuidadosamente o movimento da lâmina, podemos imaginar através de qual fenda passa um elétron. Imaginemos o que acontece quando o detector está colocado em $x=0$. Suponhamos que um elétron, ao passar pela fenda 1, sofra colisão com sua parede lateral, seja desviado para baixo e acabe por alcançar o detector. Como a componente vertical (x) do momento do elétron muda, a lâmina deve retroceder com igual momento, na direção oposta. A lâmina sofrerá um leve deslocamento para cima. De modo similar, se os elétrons atravessarem a fenda inferior e colidirem, a lâmina deverá se movimentar levemente para baixo. Então, para cada posição do detector, a direção do momento recebido pela lâmina dependerá de o elétron ter passado pela fenda 1 ou pela fenda 2. Assim, *sem perturbar de nenhuma forma os elétrons, mas apenas pela observação da lâmina,* podemos dizer por qual fenda passou o elétron.

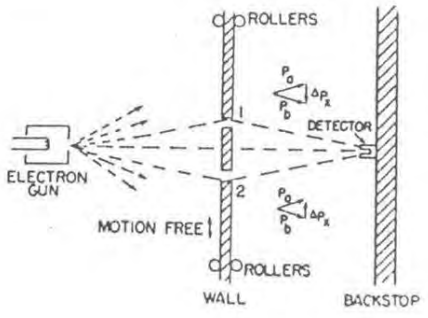


Fig. 1-6. Um experimento em que se mede o retrocesso da parede.

APÊNDICE C – Questionário de Avaliação das Atividades

Questões de Pesquisa - <u>Não há necessidade de identificar-se.</u>

Pedimos que leia e responda o questionário abaixo da maneira mais sincera possível, procure responder **cada questão na ordem apresentada, sem ler antecipadamente as questões subseqüentes.**

Agradecemos sinceramente sua valiosa colaboração.

Questão 01:

Avalie a dificuldade do conteúdo apresentado:

( ) foi um conteúdo muito fácil ( ) foi um conteúdo fácil

( ) foi um conteúdo muito difícil ( ) foi um conteúdo difícil

Outro: ( )_____

Questão 02:

Avalie a compreensão do texto utilizado:

( ) foi de fácil compreensão ( ) foi de difícil compreensão

Por que?

Questão 03:

Quanto ao uso dos textos para compreensão do fenômeno quântico:

( ) ajudaram muito a pensar e compreender o conhecimento quântico envolvido no experimento da dupla fenda com projeção de elétron.

( ) ajudaram a pensar e compreender o conhecimento quântico envolvido no experimento da dupla fenda com projeção de elétron.

( ) pouco ajudaram a pensar e compreender o conhecimento quântico envolvido no experimento da dupla fenda com projeção de elétron.

( ) não ajudaram a pensar e compreender o conhecimento quântico envolvido no experimento da dupla fenda com projeção de elétron.

Comente sua resposta:

Questão 04:

O uso das animações de computador (softwares) contribuiu para uma melhora na compreensão do comportamento das entidades físicas estudadas (projéteis ondas e elétrons)? Explique:

Questão 05:

Qual das atividades você mais gostou de fazer:

( ) a atividade :com projéteis ( ) a atividade com ondas da água

( ) a atividade com elétrons.

Diga o que o levou a gostar mais desta atividade.

Questão 06:

Qual das atividades você menos gostou de fazer:

( ) a atividade com projéteis ( ) a atividade com ondas da água

( ) a atividade com elétrons.

Diga o que o levou a gostar menos desta atividade.

Questão 07:

O que você achou da seqüência das atividades e dos conteúdos? Comente.

Questão 08:

O que você achou do tema estudado:

( ) muito interessante ( ) interessante

( ) pouco interessante ( ) nada interessante

Por que?

Questão 09:

Como você se sentiu durante o desenvolvimento das atividades?

( ) nada perdido ( ) um pouco perdido

( ) perdido ( ) muito perdido

Diga o que o levou a sentir-se assim:.

Questão 10:

Considerando o que foi discutido nos três dias de atividade e, em especial, sobre o comportamento de entidades sub-atômicas, responda:

a) Você acha que é possível chegarmos a uma explicação que irá descrever o comportamento real dos elétrons?

b) Com base em sua resposta anterior, o que você diria sobre a possibilidade de se conhecer a realidade da Natureza?

c) Considerando de modo geral a atividade executada, podemos afirmar que a Ciência é uma atividade pronta, acabada e estática, ou que está em contínua transformação? Explique.

d) Que concepção você tinha do comportamento do elétron (ou do que ele era), antes da atividade? E depois dela?

Questão 11:

Faça os comentários que você julgar necessários sobre as atividades desenvolvidas com as entidades (projéteis, ondas, elétrons); com o texto e, finalmente, com a animação em software:

Questão 12:

Sobre as etapas e a seqüência de desenvolvimento das atividades, há alguma(s) dela(s) que você julga desnecessária(s) no estudo do experimento da dupla fenda? Sim (....) Justifique. Não (....). Justifique

Questão 13:

A forma com que o professor trabalhou na atividade diferiu de sua forma de trabalho em sala de aula? Se sim, em que aspectos?

Muito obrigado por sua colaboração!

APÊNDICE D – Transcrição das falas – Sistema com partículas

ATIVIDADES – SISTEMA COM PARTÍCULAS
Data: 05/09/06 Turma I

Introduzindo a atividade
Professor: Turmaaa, olha...(gravadorzinho) peço licença pra gravar com esse (...) que é bem mais sensível do que aquela máquina lá...
Eu quero começar a fala minha, lembrando de um detalhe bastante importante...A NMM lembrou bem. A gente agradece aqui de público, agora já gravando, o auxílio do Marcelo, na parte de filmagem e eu aproveito para salientar uma coisa que a NMM falou que é a seguinte: o direito de imagem de vocês está preservado o tempo todo. Isto quer dizer que esta fita não vai ser jamais divulgada publicamente, apenas para fins do trabalho da NMM. A mesma coisa para a gravação. ok? Nós estamos preparando um documento que vocês vão, que nós vamos assinar junto com vocês nos comprometendo a não fazer essa divulgação pública, tá. Tudo isso tem que ser feito no sentido sempre, de que é uma atividade extra sala de aula, então nós temos que agir profissionalmente aqui e resguardar essa imagem e os comentários todos de vocês, portanto podem ficar à vontade, não tem nehum tipo de restrição aqui...

A qualquer instante, né....vocês foram convidados livremente a participar da atividade. Quem desistir de participar da atividade, não vai sofrer nenhum tipo de ônus, até porque eu não estou aqui na frente hoje, na qualidade, nesse momento, na qualidade de professor de quântica de vocês. Eu estou na qualidade de professor do departamento, que está co-orientando a NMM, no doutorado dela. São dois enfoques diferentes. Então... ah professor, eu não quero participar. Não tem problema. Isso não tem nada a ver, a atividade de hoje não tem nada, absolutamente nada com a minha disciplina de quântica a não ser o conteúdo. Está claro isso? Então, se alguém quiser livremente falar ah professor muito obrigado, mas eu prefiro não participar. Fiquem à vontade.

Mais uma vez eu quero agradecer vocês pela acolhida, né... à esta nossa proposta de trabalho e falar que nossa atividade hoje começa com uma coisa bem simples, bem..., não vou chamar de trivial porque não é, mas.é simples e que a gente vai procurar ao longo desses três períodos, discutir uma questão importante em mecânica quântica.... Bem, o problema que a gente vai começar a discutir hoje, chama-se o experimento da dupla fenda. Esse é um experimento muito conhecido no mundo físico, tanto de ponto de vista clássico, quanto do ponto de vista quântico... A atividade de hoje... ela vai ser voltada, principalmente, para a gente poder trabalhar com vocês, um problema clássico... Não é um problema quântico que vamos lidar hoje. Hoje nós vamos lidar com um problema clássico e observar os resultados, em cima deste problema clássico. Ok?
Acho que é isso né... Então, o que é o experimento da dupla fenda?
Professor: Nós vamos distrbuir uma figura prá vocês e nós vamos pedir uma representação. Nós vamos explicar essa figura pra vocês e vamos pedir uma representação para vocês, sobre essa figura.
Pausa (disbribuindo as figuras)
Professor: Todo mundo recebeu?
Bom, vocês têm aí, né...um arranjo... vamos chamar isso aqui de arranjo experimental, mas do lado esquerdo ali, vocês têm uma metralhadora né..., e essa metralhadora tem um cano mais ou menos móvel aí, uma metralhadorazinha... Na frente da metralhadora têm uma parede e essa parede tem uma fenda, conforme está mostrado aí. Atrás dessa parede né, a última figura lá no alto, à direita, temos uma outra parede e essa parede tem a peculiaridade de absorver os tiros da metralhadora. Por exemplo, pode ser uma parede de madeira, na qual os projéteis vão ficar encravados. Ok? Percebam que o cano da metralhadora tem uma certa mobilidade Então, a metralhadora não atira projéteis, apenas numa única direção. Há uma certa mobilidade.

No cantinho de baixo a direita vocês têm aquilo que representei como uma vista superior ali. Então visto este mesmo arranjo experimental de cima, tem esta vista superior Percebam que no anteparo de madeira, por exempo final, que vai absorver esses tiros tem um sistema de coordenadas (de eixo aí) onde está mostrado o centro do arranjo experimental (zero) e x que está numa orientação específica prá esquerda .....não tem problema, poderia ser pra direita...mas em particular, nesse caso hoje, preferimos representar a esquerda.
Bom, o que é que nós queremos que vocês façam. Uma coisa extremamente simples. Nós queremos inicialmente que vocês representem nesta última parede aqui (mostra a figura) a esquerda... que tem a coordenada... nós queremos que vocês representem os tiros da metralhadora que vão acertar essa parede. Apenas e tão somente isso. Lembrando que esta primeira parede aqui, ela não é permeável, os tiros não atravessam e tem a fenda. Ok?

DFN:. Professor!...
Professor: Diga DFN
Aluno 1 . O zero está bem na frente ...??? (não identificado)
Professor : O zero ele está alinhado, esta é uma boa pergunta do DFN, o zero está alinhado com o cano da metrahadora, tá.., e ele passa... e a fenda não está na frente. ...Percebam na vista suprior turmaaa, dá uma olhadinha na vista superior oh, que vocês vão ver o eixo direitinho, estão vendo?...então,.o zerinho ele está alinhado com o cano da metralhadora, mas não está alinhado com a fenda. Perceberam?
Aluno 2 – Professor!.[...].a espessura dessa parede aqui, como que é?
Prodessor: A fenda?...Olha..., não é muito espessa, é mais ou menos, guardadas as proporções.... oi?
DFN: mas a bala não atravessa...?
Professor: Não atravessa.ela, tá?
Aluno: Não é muito espessa?
Professor: Não é muito espessa. Pode pegar no canto da parede.
DFP: [...]desenha as balas na detrás?
Professor: desenha as balas na detrás.
DFP:
Professor: O desenho é livre, vocês podem desenhar do modo que vocês acharem melhor.
Aluno: Pode usar régua?
Professor: Pode. Professor, pode fazer a lápis? Pode...
Aluna: A bala não passa.por aqui...?
Professor: Ela não atravessa a parede ...Ela passa pela fenda. Ela não atravessa a parede.
Aluno:
Professor: Não é muito espessa a fenda. Ela pode bater no cantinho...tá.
Aluno: o movimento dessa arma [...]
Professor: Ela pode se movimentar .um pouco...
DFN: ...a fenda...
Professor: Fiquem livres... O que você acha? Fiquem livres para representar, todas as possibilidades que vocês quiserem. A metralhadora, o cano da metralhadora tem esse..., movimento horizontal e tem movimento vertical também. Ela pode atirar projéteis, tanto com algum movimento horizontal quanto com algum movimento vertical também. Ok?

Alunos:
Aluna: pode ....?
Professor: Podem fazer do jeito que vocês acham que são esses projéteis na parede lá do fundo...Pode fazer o que você quiser, DFP.
Professor: A metralhadora dá um monte de tiros tá, então não economizem...vocês estão mais para PCC do que para polícia, então... tem bala a vontade, tá.
Risos...
DFP: Essa primeira parede aqui, não é a prova de bala, a bala não fica retida nela, ela pode ricochetear?
Professor: Pode ricochetear
Alguém: toc, toc,toc.....desenhando as balas (risos)
Aluna: Precisa por o nome, professor?

Professor: Por favor, a identificacão turmaaa... é só para a gente depois poder organizar as figuras, tá? Os nomes de vocês também vão estar absolutamente preservados. Ok?

Aluna:...DFN: A Vanessa tava...
Professor: Fala DFP...
Professor: Quem acertar a resposta ... vai sair daqui pilotando avião.
Risos
Professor: Eu só falei isso para deixar claro para vocês, o quão não importante é o resultado certo ou errado de vocês...tá? Por enquanto não tem nada a ver, aliás, em momento algum isso é importante, tá.
DFP: o combinado...
Professor:No final de hoje? lá no Pilequinho comer umas batatas...
Professor: Vê Marcelo, tem que negociar, troquei por uma porção de batatas fritas essa ...
DFN: entrega a atividade
Professor: Ok? Todo mundo já devolveu?
Professor: Então ó...Segunda atividade. Daqui a pouco nós vamos discutir isso com vocês.
NMM: [...] agora que vocês já sabem que a parede é resistente, não vai atravessar... [...] nós pediríamos para vocês não conversarem. Senão não dá para entender a gravação..

Professor: a idéia é essa, a idéia é a gente deixar ver o efeito da metodologia, independente por enquanto, da discussão de vocês..., daqui a pouco a gente vai abrir uma discussão, tá.
NMM: eu não me expressei bem..., não se trata de conversar, mas de perguntar, né.
Professor: É, deixar mais livre para as idéias de vocês, tá...
NMM: antes precisava saber como era a parede...(Professor: se absorve, não absorve, é resistente ou não é...)
NMM: mas agora é a mesma parede...
Professor: Turmaaa, é o mesmo arranjo experimental. No entanto, percebam que nós temos agora uma parede com duas fendas, né. Todo mundo recebeu? É uma parede com duas fendas e percebam, embaixo, né... na projeção superior, na vista superior que o eixo zero, né... ele passa exatamente por essa parede do meio e que as duas fendas estão em posições simétricas com relação a esta posição central. Conseguiram compreender isso? Então, se precisarem de um auxílio, ainda do ponto de vista esquemático[...] na essência é isso aqui, em todos os casos, né... (vai para a lousa representar o esquema) Tá aqui a metralhadora (esquema na lousa).

Professor: Ok? Então, na lousa tem um esqueminha superior mostrando que continua tudo igual, a metralhadora está aqui..., o canhãozinho..., o caninho dela tem mobilidade e ela está alinhada.com o x [...], então as fendas, estão em posição simétrica com relação ao centro do arranjo experimental.

DFN: fez rapidamente
Aluno: Professor?
Professor: Todo mundo terminou? Beleza? ...Aluna:...
NM: Gente, agora nós vamos devolver esses desenhos, essas figuras. Professor: A primeira figura, não é?
NM: Eu acho que nós vamos devolver as duas...
Profesor: Primeiro eu acho que nós vamos dar uma examinada, NMM....Pode continuar, pode ir devolvendo essas daí. Eu só quero dar uma examinada.....
NM: O que é que vocês vão fazer agora, né... Porque prá nós interpretarmos o desenho de vocês gente analisar o desenho de vocês, pode ser que a gente corra, incorra em erros, né... Uma coisa é aquilo que você está pensando, outra coisa é como estamos interpretando da sua representação. Vocês vão usar essas folhas , né... e escrever, fazer um pequeno texto do que vocês representaram. Então, tipo assim...: Eu projetei.... Os projéteis estão na tela...porque... eles passaram de tal forma, então..... o que vocês imaginaram...porque para desenhar, para representar isto vocês pensaram na trajetória, sei lá o que...dos projéteis. Então agora vocês vão escrever pra ver se bate, com a nossa...com aquilo...que nós olharmos aqui (mostra a representação) e vamos ver o que é que você pensou realmente prá desenhar isso. Tá.

NMM: Professor, eu acho que devemos devolver os dois, né...
Professor: Assim vocês ficam livres para examinarem...
NMM: E acho que talvez vocês olhando... podem fazer aqui mesmo no verso (aponta a folha). Fiquem a vontade..., para vocês explicarem e depois a gente vai passar para mais uma figura, para um trabalho de gráfico, para depois a gente passar para a discussão e outros momentos posteriores, tá...
Devolvendo os trabalhos para os alunos examinarem seus desenhos e produzirem seus textos.
NMM: Seria algo assim... Por que você fez assim esse desenho, né?
Aluno: Pode explicar os dois desenhos num texto só?
NMM:Explicar os dois nun texto só? Pode, pode ser
NMM: Vocês devem estar pensando: Por que recolher e depois devolver, né: A gente já fez a primeira observação para que dependendo do que vocês fizeram o encaminhamento poderia ser outro... Nos próximos a gente vai ter outro procedimento. Esse inicial a gente...
Aluna: Pode fazer na frente?
Professor: Pode, se couber...se não tiver espaço faça no verso
Aluna: Pode mudar o desenho?
Professor: Você quer modificar sua figura?"
Aluna: É ...Risos...
NMM: Eu acho que não tem necessidade, (Professor: nesse momento ainda não?) você pode até citar no seu texto que você que já reviu a forma da sua..., mas no texto, na figura não, porque a gente já fez uma prévia, né...
Professor: A primeira manifestação de vocês é importante.
NMM. É, é muito importante
NMM: você pode escrever que já refletiu... Professor: gostaríamos de ter a primeira representação de vocês [...].
Tempo para elaboração do texto...
Professor: Turmaaa, quem terminar segura um pouco o desenho, tá.
Professor: Mais um minutinho é suficiente?

Professor: Bom, isso que a gente fez né, a atividade que vocês fizeram, ela...foi feita em cima de uma resentação gráfica de uma parede..., com uma metralhadora...,enfim, coisa desse gênero... tem uma parede e lá no fundo...tinha lá uma coisa que absorve os projéteis da metralhadora...e os projéteis ficam encaixados aí....vocês representaram os projéteis, né. Isso que vocês fizeram é uma representação que a gente chama de representação analógica, da natureza. Por que faz uma certa analogia, há uma similaridade representacional com .o evento físico alí...né.., .eu não trouxe uma metralhadora para vocês atirarem, por sorte...(risos), em parede nenhuma, nós fizemos o desenho e, vocês fizeram a representação física do que acontece. Então vocês fizeram uma atividade analógica. Agora a gente convidar vocês para fazer uma atividade diferente, que é a. representação matemática disso que vocês fizeram. Então é uma representação matemática, Para tanto nós vamos distribuir ... Risos...

Alunos: estava tão bom...
Professor: Estava tão bom, né... Estava tão fácil... estava tão legal...Fiquem com as figuras por enquanto...
Aluna:
Professor: Calma aí, que nós vamos chegar lá...tá.
Aluna:
Distribuição do papel milimetrado
Professor: Todo mundo recebeu o papel de gráfico?
Professor: Então, vocês receberam um papel milimetrado, daquele que vocês vão usar muito em fisico-química experimental. E o que nós vamos representar nesse gráfico... eu vou fazer mais ou menos aqui o desenho..., no papel..., o que eu vou pedir prá vocês representarem aqui no papel ... é mais ou menos assim né... (na lousa). Eu vou colocar o sistema de referência que nós tínhamos, né... e esse gráfico aqui... ele vai conter: vocês podem até fazer aí a caneta...um, eixo x na mesma orientação que vocês têm... vamos marcar o zero [...] x, nesse eixo x que está aqui... Então essa linha vertical marca ...a posição zero.de x aqui né.. ok? E o que eu vou pedir prá vocês é fazer, representarem é um gráfico, fazer um gráfico de probabilidade, né... de distribuição dos projéteis na parede.

DFN: Qual dos casos?
Professor: Podem fazer um caso..., podem fazer os dois casos..., fica a escolha de vocês. Então, é um gráfico de probabilidade de... impacto dos projéteis na parede. Alguma dúvida?
DFP: Para os dois casos?
Professor: pode ser nos[...], o ideal que nos dois casos, tá. Nos dois casos, ou no sistema com duas fendas, NMM?
PQ: Pode ser para duas fendas.
Professor: O caso das duas fendas, ok...
Aluna:
Professor: Não dá prá fazer os dois casos [...] NMM... uma fenda e de duas fendas?
NMM: Isso...
Professor: Pronto oh. Risos
Professor: [...] já que a DFF...
Professor: Podem fazer agora um gráfico.
DFF: [...] não entendi nada, mas é essa parede do fundo
Professor: Isso... DFF....Alunos: [...]
Professor: Pessoal oh..., Prestem atenção..., DFF a [...] nós temos um gráfico, não temos uma parede. Eu não estou pedindo para vocês fazerem a representação analógica no gráfico. Eu pedi uma representação matemática de probabilidade de distribuição dos projéteis na parede. Percebam isso. Ok, alguma dúvida ainda?...É um gráfico de probabilidades, vocês lembram de gráficos de probabilidade que nós fizemos na quântica?..... Psi quadrado, aí... vai, se preferirem.
Aluno: Complicou...
Professor: Agora complicou né...
Professor: Não tem importância, façam o que vocês acham que devem fazer. Não tem problema nenhum...
DFP: Professor!
Professor: Quem me chamou?
DFP: Eu
Professor: Ah, a DFP. DFP: Precisa colocar o nome no gráfico?
Professor: É bom, por favor...coloquem o nome no gráfico.
Professor: É a gente não deixou explicitado, né.
DFP: Pode...
Professor: Por enquanto....Alunos: (risos)
Alunos fazem comentários (não dá para entender)
DFN: Professor é um gráfico de probabilidade ou vai desenhar...

Professor: gráfico de probabilidades
Comentários...Risos...Alunos: [...] ...DFN:
Professor: Não se preocupa DFN
Aluna: Não vale nota DFN.
DFN:
Falam juntos (difícil entender) integral...(risos) ...Professor,
NMM: Gente..., agora nós vamos abrir a discussão desse processo que vocês representaram até agora.
Conversas cruzadas....não dá para entender os alunos estão entusiasmados...falando ao mesmo tempo.
Professor: Todo dia é assim na aula. Você sabe, né...

NMM: Eu conheço uma parte ...Professor: Você conhece, né...
Bem, o que é que nós vamos fazer agora, temos aí o que vocês representaram individualmente, meio né... ou seja, cada um fez individualmente né, de acordo com a primeira forma de pensar sobre oque foi apresentado para vocês...O que é que nós vamos fazer agora é trocar algumas experiências e prá isso, nós gostaríamos de deixar livre para quem quizer contar para a turma, O que fez? Por que fez assim? Qual sua trajetória ao representar seu desenho, seu texto. Vocês devem estar pensando, mas está tudo escrito aí..., mas é importante que o grupo também saiba o que o colega pensou, né. É diferente do que você pensou? Tem alguma semelhança? E podem inerferir, os demais podem interferir. Não há necessidade de consenso, porque como nós falamos, nosso objetivo não é a aprendizagem, o conheciemnto de vocês [...] mas se didaticamente isso seria bom ou não, essa troca nesse momento. Então é isso que nós vams fazer e o Professor achou melhor deixar livre, conhece muito bem vocês, já que tem muita gente querendo falar...então a gente vai deixar livre para quem quiser explicar prá turma .qual foi a trajetória de pensamento, de registro ao elaborarem esses documentos (aponta os desenhos) Isto é um documento bastante importante prá nós..(alunos falam)....Mas de repente o que vc representou, o que vc escreveu ainda não é o suficiente para que a gente.entenda no contexto global. É um importante esse momento de troca. Quem gostaria de fazer isso?
NMM: DFF...se você quiser mostrar, se você quiser falar...
DFF: É assim, eu coloquei o segundo anteparo....
NMM: Você pode falar desde o início, primeiro o que você fez? Por que você fez assim...?
DFF: Eu cloquei todo[...] anteparo..., eu penso que vai acertar no canto da fenda e vai para [..]...os projéteis podem ir prá qualquer lado,...pode acertar o plano inteiro é lógico que no plano que passa na direção da bala [...] no anteparo vai ter uma probabilidade de acerto maior alí, né. No segundo.....vai ter uma probabilidade acerto maior no meio .... a metralhadora está direto no [...] Então é isso, as duas fendas vai ter maior incidência no meio porque vai acertar os dois cantos das fendas aqui no meio e vai sobrepor atrás, alí atrás e na direção das fendas vai ser maior também, mas vai ser na perede inteira. (REVER)
Professor: Quem concorda, discorda?
Aluno: Eu não concordo no primeiro[...], os dois em qualquer parte do anteparo pode ser acertado [...]. Vai ter diferentes probabilidades. Ele falou que no segundo, a maior probabilidade vai ser no meio, eu discordo...porque no meio vai ser de menor probabilidade nas extremidades, vai ter maior a probabilidade.(REVER)
NMM: o segundo que vc diz é o segundo experimento, da dupla fenda.
Alunos:...
DFN: [...] no experimento da dupla fenda só vai acertar as balas que forem ricocheteadas? Concorda? É
DFN: Então, então é menor porque vai passar mais, elas ...
Aluno: Ela passa mais do que ricocheteia, entende?
DFF: Eu não quis dizer que unicamente atrás da fenda vai ser maior, vai ser na direção certa [...] nas duas fendas e atrás
DFN:
DFF: é então, foi o que u disse, vai ter no meio uma probabilidade maior.... vai ser na direção certa, ...nos três casos...Eu queria mostrar meu desenho....
Alunos:
DFP: vai ser a menor chance de acertar, assim [...] você umaginou tamanho ara a fenda. A fenda que eu imaginei era estreita, então ...e nesses dois pontos onde vai ter maior probalidade de acertar, vai ter um pequeno desvio só em volta e não na parede toda
DFN: [...] igual a da DFP também, só que a gente tem que saber a espessura da parede ....você não vai ter uma grossura da parede que vai vai dar para desviar com vários ângulos, você vai ter um ângulo só que vai desviar.....
Várias falas (confuso)
Aluna: Eu aho que nas laterias vai ter menor probabilidade.
Confuso

DFJ: Oh pessoal, na frente vai ter uma fenda, só .[...].o que tem que fazer, que nem...a metralhadora só vira assim, então vai pegar no conto aqui.... não vai pegar na parede...
Alunos: confuso (falam ao mesmo tempo)
DFN: ... só da luz... Alunos:.. (risos)
DFN: mas depende da espessura da parede
Alunos:
Professor: O registro da opinião de cada um de vocês para nós é fundamental..., agora..., esse troço aqui tem apenas um canal...(risos)...Muitas das opiniões de vocês nós vamos poder coletar individualmente, mas eu gostaria que talvez 3 ou 4 de vocês generalizassem as suas idéias com relação a essas representações aqui. O DFF, acho que a gente já tem claramente... a gravação, o DFR também... Alguém mais quer..., de maneira geral discutir ou comentar...?
DFP: ... o que eu e o ... estávamos discutindo é que a gente acha que tem que levar em consideração a espessura da parede e a espessura da fenda...Eu acredito também que ele imaginou que a espessura da parede não era tão larga e a espessura da fenda era estreita. Aí...se você considerar dois pontos no caso de uma fenda, os dois pontos de maior probabilidade que é onde ela bate e desvia e um que ela entra sem desviar na parede e um pequeno desvio em volta disso. E o das duas fendas, o mesmo caso... Duas entradas diretas, duas entradas com desvio e um pequeno devio em volta desse eixo...
DFJ: Eu acho que a que tem uma fenda só, não pega na parede inteira,.vai pegar só uma parte da parede.... mesmo as que desviam, vai ter só uma parte que vai pegar que é só a metade do meio que corresponde a fenda. E a que tem duas daí vai ter a de maior probabilidade e a de menor probabilidade. A que vai ter maior incidência e a que vai ter menos menos desvio também.
Professor: Mais alguém? OK? (risos)
Professor: Então tá, nós vamos passar uma animaçãozinha hoje, curta para vocês.
Aluna: Curta metragem
Professor: Curtíssima metragem
Professor: É uma aminação sobre o tema, sobre o evento que estamos lidando aqui. Hoje nós vamos passar só um pequeno trecho, mais voltado àquilo que vocês representaram até o momento, né.
Apaga a luz, por favor, DFL...
Professor: Essa animaçãozinha... eu não sei, eu não localizei ainda todas as informações dela, naturalmente até o final da atividade eu vou localizar o autor da animação e a Universidade que gerou essa atividade...,mas é um personagem quântico aí, uma caricaturazinha de um super herói quântico, já relativamente idoso que vai discutir esse experimento, né, que nós estamos discutindo aqui. Então a gente vai ver hoje somente a primeira etapa do experimento, que é o que discutimos hoje. A fala está em inglês, bem claro o inglês, quem quiser aproveitar para exercitar seu ouvido em Inglês, que é muito importantíssimo. Quem tiver dificuldade, o importante, naturalmente é a imagem e quem quiser discutir a fala no Inglês, a gente pode, depois discutir essa fala. Então vamos assistir ao primeiro trecho aqui, do...nosso amigo.
Apresentação do filme....
Professor: Eu vou reproduzir novamente para vocês aqui, tá.
Reapresentação do filme...
Aluna: Professor!, mas no...contém uma fenda só.. no videozinho, parece que a metralhadora do vídeo está bem na frente da fenda, ou está igual a que a gente fez?
Professor: Ela... têm algumas partículas, algumas pequenas bolinhas que colidem na parede e retornam, na realidade o experimento também distribui as bolinhas, mais ou menos da mesma forma que a metralhadora distribui. Tá..., ok?.
Professor: O que vocês acharam do filminho, por enquanto? Nós vamos parar aí hoje,tá... porque na semana que vem tem mais novidade com relação ao filminho....Agora.., alguém quer fazer algum comentário.Tranquilo? Agora nós vamos passar um texto para vocês prá gente debater... (risos)
Professor: O que que acontece?.....Tá aqui NMM?
Alunos: comentam entre si, enquanto os textos são distribuídos.
Professor: Bom, esse texto que vocês têm aí, é uma adaptação de um texto em inglês de um livro de física..., de um físico muito bom que é Richard Feynman. Foi tirado então, um fragmento de texto do volume III do Feynman que a NMM traduziu e adaptou o texto e a gente vai debater a primeira parte deste texto hoje, né. Então, eu vou fazer a leitura prá vocês e conforme surgirem dúvidas e vocês quiserem debater ... nós estamos à vontade. Então: "Comportamento quântico"
Professor: lê o texto e os alunos acompanham a leitura por meio de seus textos.
Professor: interrompe a leitura chamando a atenção dos alunos aos aspectos destacados abaixo
...Vocês vão perceber que o texto é bastante romanceado, ele tem assim, uma linguagem bastante...é... um dialogo realmente com as pessoas, o texto, né.
...São sistemas fisicos que talvez vocês conheçam dentro dos laboratórios de física.

...A qualquer momento vocês podem interromper também prá gente tirar dúvida. É livre, a atividade.

...Então, o Feynman..., agora vai fazer um experimento que é similar ao que vocês fizeram de representação aqui...

...Reconheçam essa figurinha aí que vocês acabaram de lidar com ela. Uma metralhadorazinha, uma parede com duas fendas e um anteparo detector aí. Ok? (se reportando ao dispositivo experimental no texto).

...Compreenderam a maneira de se calcular a probabilidade?... Só pra gente enfatizar bem.

...Compreenderam a maneira de se calcular? É o que penetrou na caixa de madeira dividido pelo total que incidiu naquela superfície toda, para cada unidade de tempo. Ficou claro isso?

...Resumindo: Projéteis sempre chegam ao detector idênticos e inteiros (Isto é uma constatação importante). Alguma dúvida aí? Tranquilo?

...Então, voltando lá em cima pessoal, nós temos agora na representação C da figura, um gráfico de probabilidades. Ok? Então...na figura, o deslocamento do detector é paralelo ao eixo x e se move verticalmente. Então... a repesentação de eixo que tem aqui na figura é idêntica à representação de eixo que vocês trabalharam, né, ...ok?

...Tranquilo aí?

...Por que será que P_1 tem seu máximo em x=0 e não exatamente na frente das fendas 1 e 2 respectivamente? Isto é uma questão que nós vamos discutir inclusive além do texto, hoje...

...Então, cobre-se a fenda dois, portanto ficamos apenas com a fenda um aberta, então repetindo o experimento, desta vez cobrindo a fenda um. Então cobre-se uma fenda, faz-se o experimento, depois cobre-se a outra fenda, libera a primeira e faz-se o experimento novamente.....Compreenderam?

...Então olhem lá...tem a primeira curvinha P1 localizaram aí...?

...Conclusão importante até o momento. Projéteis chegam em unidades inteiras e sua probabilidade de chegada é a somatória simples de P1 e P2, não exibindo padrão de interferência. Ok? Dúvidas?

DFN: ... interferência?
Professor: Não interferência, a gente chama esse resultado de não interferência. O que significa isso? Próximo encontro nosso, a gente vai debater.
DFN: [...] mas essa largura dessa parede que nem se tiver só um ângulo[...] e se essa parede tiver só um ângulo...esse projétil pode ser desviado, aí não vai ter probabilidade, vai ter só um ângulo que ele pode acertar, essa parede [...]
Professor: Se alguém quer fazer mais algum comentário além do DFN? Podem ficar falando à vontade aqui, podem criticar o desenho...não tem problema algum. Até por que essa hipótese levantada pelo DFN é muito séria. DFF:
O que foi levantado pelo DFN é muito importante
DFN: DFF??? [...] vc concorda também que se fosse fina teria mais um ângulo
Professor: Quem quer acrescentar mais coisas? O que é que vocês acham?
Professor: Alguém discorda da opinião dos dois meninos?
DFT: A velocidade é a mesma da distância da parede das fendas, ou não? .....na representação das duas fendas.
Professor: Na representação esquemática que está aí eu acho que sim, mas eu não sei se isso faz diferença viu DFT.
DFT: Esse esqueminha aqui... por causa do ângulo, senão.....ia dar uma
Professor: Isso...mas de qualquer forma vocês fizeram observações muito pertinentes e muito importantes aqui. Vocês reconheceram no texto algumas das argumentações que vocês tiveram aqui, na fala?...Reconheceram essas argumentações
Professor: Alguém quer falar mais alguma coisa?
Professor: Eu quero discutir uma questãozinha...O texto diz o seguinte: que na posição x=0 a probabilidade vai ser máxima ok, como o Fernado salientou aqui... Agora, outras pessoas aqui, acho que foi o DFR e o DFN argumentaram que isso não é verdadeiro, ou a DFP. Quem de vocês está correto? O que é que vocês acham?

DFF: Eu tinha concordado com ele... eu acho que na direção reta aqui, no ângulo reto... teria que ser maior. Assim, tem três pontos maior ou seja, o ângulo reto (Professor inerfere) ou seja: em linha direta entre o cano da metralhadora e a fenda) e a parte da sobreposição[...]o ângulo reto vai ser um pouco[...]
Professor: No centro é maior [...] qual foi a argumentação do DFF, nesse momento?
DFP:
Professor: No entanto, o texto fala o que?DFP: que no centro vai ser maior
Professor: No centro é maior... mas na argumentação dele...Qual foi a argumentação do DFF, nesse momento? [...] Tudo bem, mas se ela não tivesse ...
Aluna: A espessura é desprezível
Professor: DFF, use, refale...recomente a sua argumentação para explicar porque é maior no centro?
DFF: Porque há uma sobreposição.... DFN:...
Professor: E o texto fala o que? Que esse centro é o que?
Professor: Agora, alguma dúvida aí?
Professor: Muita...Fala DFS...É claro?
: que é a soma das duas probabilidade.
Aluna: Mas naquela imagem (Professor:no filminho?) tipo tio, sei lá... na animação só foi alí no meio, porque não ricocheteou, sei lá...[...]
Professor: Não havia desvio alí.
A espessura da parede não foi considerada naquela animação.
DFP: Eu acho que aquela parede não foi considerada, naquela animação.
Alunos:...
DFP: Não só a espessura da parede ou a espessura da fenda [...] conforme for a distância ele não vai bater e voltar aqui no centro ele vai desviar mais prá cá ou mais prá lá...
Professor: Olhando para esta figurinha... Os comentários de vocês são muito pertinentes. Agora... olhando para esta figurinha que tem aí, eu quero que vocês tentem localizar mais um fator que afinal de contas vai resolver, se essa intensidade é maior no centro ou menor e se pode ser maior numa situação e menor em outra. Eu acho que olhando para a figurinha vocês têm condições... (Fala DFF...)
DFF: Eu acho, se eu estou conseguindo enxergar aqui, por exemplo eu tenho que considerar a espessura da fenda, portanto assim, se ela for desse tamanho,.é o que tá aqui...se ela acertar nesse ângulo correto, nessa ponta, a chance dela acertar o meio é maior. É isso que tá no desenho, foi isso que eu entendi.
Professor: Ok. Eu não vou comentar certo ou o errado pra vocês não tá. A gente quer justamente é saber exatamente o que vocês tiram de conhecimento de toda essa discussão.
DFN: Por que o desvio tem que ser justamente no meio? Ele desvia aqui, não é? e vai pro meio, tem a probabilidade no meio.
Professor: Analisem as curvas, primeiro independentemente. As curvas P1 e P2 e depois tentem analisar a terceira.
Alunos: [...] é no meio né..., é somatória... DFF: só P1 ou só P2.
Professor: Analisem só a P1 ou só a P2 e debatam o resultado só da P1 e só da P2... Concordam ou não.
DFF: ... DFJ: Professor, quando tem duas curvas[...]é isso mesmo?

Professor: O que é que você acha?
DFJ:Então porque justo no meio ...
Professor: A soma das alturas de duas curvas que se sobrepõe é a soma das alturas. Isto é um fato matemático ok?
DFJ:Claro! Mas aí ela vai ter esse formato?
DFF: A maior
Aluno: Não professor, a maior probabilidade alinhando cada fenda...vai ser bem no meio... do desenho
Professor: Alinhando...como?
Aluno: [...]
DFJ: quando for...ela não se destrói... Aqui?
Professor: Isso é uma curva matemática. É um gráfico. Em que condição ela se destrói? O que é que vc está chamando de se destrói?
Aluno: Interferência destrutiva
DFJ: Eu estava pensando assim...Eu pensei como se fosse uma onda. Quando vem uma onda de baixo e uma de cima assim, elas se destróem né. Daí pensei que no meio, tanto de uma quanto da outra é de menor probablidade, quando vem uma sozinha e quando vem a outra...daí quando vem as duas daí no meio é de maior probabilidade.
:Professor: Entendi sua discussão, na realidade você estava interpretando como se fosse...
DFF:
Professor: Quem mais, quem quer falar mais?

Professor: Tem uma informação importante que eu... que não está dada no texto, o texto não é claro, o texto não fala, o tiozinho não fala, mas a DFS observou bem, lá não está sendo considerada a espessura da fenda porque não tem ricocheteios laterais e eu vou dar mais uma informação pra vocês resolverem esse debate, se afinal de contas a interferência é maior no centro, ou não é maior no centro. Faltam dados. Qual é a separação entre as duas fendas? ..[...].Há uma separação espacial entre as duas fendas. Estas distâncias que elas guardam entre si, é importante ou não para resolver essa dúvida?
Alunos: é....
Por que? Não a abertura das fendas heim turmaaa, não estou falando da abertura das fendas, estou falando da distância que cada uma tem em relação à outra. O que é que vocês acham?
Alunos falam ao mesmo tempo
Professor: Não DFT, Eu não estou dizendo... Pessoal, é o seguinte... deixe eu explicar prá vocês, acho que não fui claro... O desenho é mais ou menos assim...tá. Não importa... Vocês já resolveram o problema da abertura das fendas e da espessura delas.ok. O desenho é mais ou menos assim ok?(representa no quadro) A informação que falta pra vocês ok? e esta daqui (o espaço que separa uma fenda da outra) Esse espaço é importante para resolver essa questão da interferência ser maior no centro...?
DFP: É importante essa distância [...]ou a distância que separa a arma das duas fendas e esta do anteparo?
Vários alunos repondem ao mesmo tempo (não dá para transcrever)...DFN: A...
Professor: Isso... é o tamanho dessa distância do meio que mantém as fendas mais próximas ou mais separadas.
Alunos: ...
Professor:Debatam aí
Professor: Vamos ouvir as opiniões separadas, para podermos registrar essas opiniões.
Quem quer começar a falar?
Gaúcho
Professor: Quem é o gaúcho?
Aluno:o DFR
Gaúcho: Já falei...
DFN: Se as cargas de P1 e P2 são iguais, elas não dependem da distância.
DFP: .... a arma está centralizada
Professor: A arma continua centralizada
DFF: pode analisar
DFN: a carga só depende da fenda 1, mas agora somatória das duas que é a probabilidade ...
Aluna: Quanto maior for a distância entre elas, menor vai ser aquela probabilidade lá em cima né... Agora para uma fenda sozinha não interessa qual a distância entre as duas... vai dar....
DFP: mas se eu abrisse a distância entre as duas (a arma e o anteparo)...o angulo que ela vai fazer, vai fazer com que ela chegue no centro mesmo que seje longe...mesmo se a distância.entre as duas seja...
DFN:
Aluno: P1 só depende da espessura da fenda.....
Professor: Mais algum comentário? Tranquilo? Bom, NMM... ok, você quer colher mais alguma opinião deles?... Bom. Turmaaa, essa foi a primeira atividade que nós fizemos, mas eu queria explorar um pouquinho mais isso e vou pedir um pouco mais um tempo de vocês, prá que a gente tente buscar algumas coisas que generalizem de uma forma mínima tudo isso que abordamos hoje aqui. Todas as observações de vocês foram muitos e interessantes, mas vamos procurar aprender e consolidar. Esse é um experimento que talvez nunca tenham feito, mas...percebam que é uma situação clássica é só fazer um buraco na parede e chegar com uma metralhadora e executar o experimento.
DFF: [...] o mais fácil é achar a metralhadora.
Professor: A parte mais fácil é achar a meralhadora, né...
Bom, essencialmente nós lidamos com que tipo de objeto físico aqui? Qual é o objeto importante que a gente analisou aí...probabilidade?
Aluno: Projétil
Professor: Algumas características importantes de um projétil que está discutido aqui no texto do Feynman:
Aluna: ...tamanho constante, ok?...ou chega um projétil, ou dois , ou três, ou zero, numa determinada posição. Ou seja, chegam na forma de que? Esses projéteis são essencialmente o que? ok, mas fisicamente eles são...?
Aluno: partículas
Professor: Partículas
Professor: Bom, muitos dos desenhos de vocês tem uma informação importante. Deixe eu pegar de novo um desenho aqui NMM, ou dois desenhos? Eu vou pegar dois desenhos bem escolhidos...Não vou me preocupar se a representação na parede...NMM, você me dá licença de pegar um ou dois desenhos.
Professor: Não vou me preocupar se a representação na parede foi dentro do previsto ou não. Não é isto que está em julgamento. Mas deixe eu pegar um resultado bem importante que eu vi aqui em algum caso...Esse resultado.aqui, por exemplo, me interessou...Eu não vou nem identificar quem é, porque não é o resultado em si

que interessa. Os dois resultados aqui turmaaa..., estão quase similares na representação aqui no anteparo, mas há uma diferença significativa entre essas duas representações aqui. O que é que vocês localizam de diferente entre as duas representações, não importa os autores das representações? Um deles fez o que que o outro não fez?.
Aluno: As probabilidades são iguais.
Professor:.[...] aqui são os projéteis, não tem um gráfico de probablidade.....não importa o resultado no anteparo.
Aluno...
Professor: Que que é a diferença? O que é que um deles representou e o outro não
Alunos....a trajetória
Professor: Representou o que DFF?
DFF: A trajetória
Professor: A trajetória. Ok, ficou claro isso? Então, um dos autores representou a trajetória e o outro não representou a trajetória.

Professor: Vocês falaram uma coisa que é importante ou várias coisas importantes. Nós temos corpusculos, partículas, conforme vocês disseram .que chegam inteiros na parede.Uma das pessoas, talvez mais foi capaz de representar o que, aqui?.. como todos vocês poderia ter representado caso quizessem. .Ficou claro isso?. Então vamos guardar bem essa informação... Outra coisa, o texto do Feynman fala de um experimento de não interferência. Vamos guardar essa informação também. O que nós temos de importante prá hoje é... Nós temos corpúsculos (fisicamente inteiros) que são contados por unidades e mais do que isto existe uma possibilidade da gente representar uma trajetória.Ficou claro isso? Alguém mais quer falar alguma coisa? Tranquilo?

Então agora eu encerro falando duas coisas importantes prá vocês. Uma delas é a seguintes:... Nós pedimos em nome da boa contimuidade do andamento trabalho (da metodologia) prá gente realmente checar a metodologia. O que é importante? que vocês não tomem contato com informações científicas sobre este experimento, por favor... Então a gente pede que não procurem livros prá resolver a questão do experimento (risos) DFN...Taaa, em respeito à qualidade do trabalho que a gente está fazendo aqui. Segundo, por favor, comentem com os colegas de vocês, que vai haver essa tentação, que no máximo nós fizemos algumas representaçõeszinhas gráficas de experimentos em física, somente isso. Fazendo isso vocês estão contribuindo prá gente poder avaliar efetivamente a proposta metodológica que afinal de contas a gente está desenvolvendo aqui. NMM, você quer fazer mais alguma observação?...
Professor: [..] das duas o que, filhota?
DFJ: [...] que dá a probabilidade no meio...
Professor: Agora... Turmaaa, a probabilidade máxima pode acontecer entre as duas duas fendas no meio? Pode. Em que circunstância?.....Vai depender do que? ....da distância que separa essas duas fendas
Se a gente separara muito essas duas fendas, a gente vai pegar exatamente na distância (x=0) a gente vai pegar o que? Exatamente o rabo muito baixo das curvinhas..... e a soma desse rabinho muito baixo nas curvinhas pode não ser maior que a do pico. Então, os dois estão corretos, porque depende da distância.
NMM? Quer falar mais alguma coisa?
É isso, então a gente agradece muito a presença de vocês...
Podem ficar com o texto.
Professor: Turmaaa, nós temos previsto um outro grupo além desse de vocês, portanto a gente pede, não divulguem o resultado e as discussões... que a gente fez. Evitem, por favor. Tá bom? ...mas guardem o texto com vocês, apenas não divulguem para os colegas, tá?Se quiserem devolver o texto e depois pegar no final;, também pode...
Aluno: [...] Nós é que agradecemos vocês, tá bom..., a atenção de vocês...
Outra coisa, nós temos que fazer duas coisas aqui que é desmontar toda essa tralha e arrumar a sala que eu entregar a sala hoje, em perfeitas condições....Entretanto...terminado isso eu vou em linha reta, num ângulo daqui pro pilequinho alí...porque tem uma fenda que está alinhada, em cheio alí no pilequinho. Tá bom turmaaa. Obrigado pela atenção.

ATIVIDADE – SISTEMA COM PARTÍCULAS
Data: 18/10/06 Turma: II

Professor: Bom, Turma, mais uma vez, boa tarde a todos. Nós agradecemos à presença de vocês.
Mesmo já tendo terminado nosso curso de quântica, vocês se prontificaram a participar de uma atividade que a NMM está elaborando por ocasião do doutorado dela. Em particular para ela, essa colaboração de vocês tem uma importância fundamental, se não for... O trabalho dela está voltado a uma proposta metodológica em ensino da Mecânica quântica... quando a gente elabora uma proposta nova de ensino de qualquer coisa, nós precisamos avaliar. Avaliar essa proposta, se ela é uma proposta eficaz ou não, envolve apresentar a proposta para o aluno, deixar o aluno trabalhar em cima dela, depois apresentar resultados dessa proposta. O que nós vamos procurar ver aqui, não é a capacidade de vocês de... o grau de conhecimento de vocês, o quanto vocês sabem ou não sabem, não é isso que estamos procurando aqui. Através da aplicação dessa proposta metodológica a gente quer procurar justamente as qualidades e os defeitos da própria proposta... Como vocês sabem esta proposta já foi aplicada uma vez com outro grupo. Nós já sentamos e examinamos o resultado do trabalho daquele grupo, em partes... o trabalho é muito longo e extenso, a análise de toda a proposta.E a gente já percebeu que algumas modificações da nossa forma de abordar o assunto tinham que ser feitas.
Então nós não estamos procurando aqui, ver o acerto de vocês... Eu diria... verificar mais nossos erros e acertos na colocação da proposta.

Bem, pra NMM trabalhar com essa proposta ela tem que fazer o registro como vocês já foram informados... audio, dessa atividade que nós vamos fazer pelo menos em três tardes. Portanto, nós precisamos da autorização de vocês... Ela recomendou, ou seja, solicitou de vocês que assinassem um termo de consentimento... livremente a participar da proposta. Em qualquer momento se vocês acharem que não querem a voz gravada... Se alguém não quiser mais participar... enfim, vocês são livres para manifestar essa intenção. Até porque o direito de voz e imagem de vocês está protegido por este termo que vocês e a NMM acabaram de assinar. O que nós pedimos é que vocês, uma vez assumido o compromisso, estejam presentes nas próximas atividades. Serão três atividades dessas que nós estamos fazendo aqui e provavelmente... nós precisamos, para avaliar se a proposta está boa ou não, da presença de vocês, nessas três atividades... Um compromisso de três tardes aí, para que a gente possa fazer o registro desse trabalho todo.

Bem, vocês acompanharam. Alguns de vocês acompanharam por algum tempo, a presença da NMM na minha sala, nas nossas aulas, e... ela acompanhou praticamente todo o primeiro semestre, e no primeiro semestre enquanto eu estava abordando... as primeiras manifestações que não puderam ser claramente explicadas pela mecânica quântica... trabalhamos com radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, verificamos o modelo atômico de Bohr... mas, a partir daí eu comentei com vocês de uma maneira até bastante curta, bastante rápida, o chamado princípio da incerteza, que proibia a determinação absoluta da posição e do momento de uma determinada partícula atômica, no caso um elétron e um átomo e comentei com vocês a necessidade de a gente trabalhar com um modelo probabilístico do elétron... e aí eu falei, olha! O modelo probabilístico que vamos trabalhar é o modelo que leva em conta uma equação diferencial parcial, a equação de Schrödinger. Nós vamos resolver a equação de Schrödinger e trabalhar com os resultados da equação de Schrödinger que são funções de ondas cuja o quadrado da função de onda descreve uma distribuição de probabilidade. Ok?

Bom, quando a gente fala em probabilidade nós estamos evidenciando a impossibilidade de uma determinação. Nós podemos falar apenas na probabilidade de uma determinação, mas não uma determinação absoluta, seja de momento, seja de posição. Então... a Mecânica Quântica, ela impõe um impedimento nesse sentido, né... dessa indeterminação e o que nós vamos trabalhar aqui, é justamente esse impedimento. Essa impossibilidade de uma descrição, digamos assim, mais analógicas do sistema. Ok?

Então, nós vamos começar com uma atividade bastante simples, surpreendentemente simples para vocês, mas que faz parte do processo todo.
Então eu vou distribuir para vocês (distribui uma folha com a representação do dispositivo experimental da dupla fenda)... Esse problema é um problema bastante conhecido na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica... e o problema que vamos tratar aqui, chama-se o problema da Dupla Fenda. Só que para a gente chegar propriamente no problema da fenda a gente vai adotar um sistema mecânico bem mais simples que é este que vocês têm... na mão.Então, no que se constitui esse arranjo experimental que vocês têm aí?
Do lado esquerdo desse arranjo vocês têm uma metralhadora. Essa metralhadora ela tem uma certa flexibilidade de movimento, pra direita e pra esquerda e para cima e para baixo. Então ela tem liberdade de movimentação. À frente desta metralhadora vocês têm uma espécie de uma parede e essa parede tem uma fenda, ok?

Olha tem uma fenda, uma fenda pela qual os projéteis podem passar. A parede é intransponível. Ela retém projéteis que não podem passar por ela, mas ela tem uma fenda aqui pela qual os projéteis podem passar. No fundo nós temos uma outra parede, por exemplo, uma parede de madeira, na qual os projéteis podem se cravar. Então, aqui embaixo à direita vocês têm uma representação da vista superior, percebam que lá tem uma parede (o eixo x) que está orientada sobre um determinado sentido... Não é, não tem importância, o sentido de orientação de x não é crítico neste caso. O centro do arranjo está alinhado com o centro do cano da metralhadora. Não sei se vocês estão percebendo isto? E a fenda não precisa... ela poderia até estar no centro do arranjo também, mas ela não precisa estar necessariamente no centro. Tanto é que vocês... percebam que ela está levemente deslocada. Ok?
Bem o que é que nós queremos que vocês façam, queremos que vocês representem nesta parede aqui, que é uma parede... vocês podem considerar que é uma parede de madeira, a distribuição dos projéteis... que forem atirados pela metralhadora. Apenas e tão somente isso.

Podem representar aí os projéteis da maneira que vocês acharem melhor, mas vamos imaginar que a metralhadora está dando tiro para todos os lados... um tiro por vez... depois de um certo tempo, como é que vai estar a distribuição de projéteis que vão se encravar... nesta parede? É apenas isto que nós queremos que vocês representem.
Aluna: A parede [...]
Professor: A altura é a mesma altura... da parede da fenda, mas se você precisar de mais dimensões da parede, é importante... Em tese é nessa paredinha aí que você tem que representar os projéteis.
Aluna: [...] eixo x
Professor: Lá no fundo alí, olha. Lá tem o eixo x, ok? Eu quero que vocês representem qual vai ser a distribuição de projéteis, nessa parede aqui... a do fundo, aquela que tem o eixo x.
DFG: A metralhadora [...]
Professor: Para cima e para baixo também, a metralhadora tem movimento...
Aluno: ...só não pode mover o eixo dela?
Professor: O eixo de fixação dela não, você só move o cano... para direita e para a esquerda e para cima e para baixo, então ela tem um certo ângulo sólido de abertura, que é grande... é bastante grande, tá... de tal modo que ela possa cobrir as duas paredes de tiros, se for o caso.
DFG: [...]
Professor: A única coisa que a gente pede pra vocês, por favor, é que coloquem o nome de vocês na figura, em cima mesmo... tem uma linha aí que dá possivelmente pra vocês colocarem.
Aluno: Foi você que preparou o teste professor?
Professor: Não, Por quê?
Aluno: Por nada
Professor: Na realidade é uma boa pergunta, não é?... nosso, meu e da NMM.
Aluno: [...]
Professor: Ah!O desenho em si é uma criação minha... portanto, por favor me poupem...
(Risos)
Professor: Ok? Vocês têm também aí um papel de gráfico e o que eu vou pedir prá vocês... e a gente pede pra vocês agora, no papel de gráfico, é o seguinte: façam um eixo x com a mesma orientação que vocês têm. Pode ser à mão mesmo, não precisa ser nada muito caprichado, mas é que nós pedimos aí pra vocês nesta representação.
Professor: Pode ser a caneta, quem não tiver lápis, não têm problema nenhum, tá?
Aluno: [...]
Professor: É o que nós vamos pedir pra vocês. É bom fazer um eixo de orientação, se vocês quiserem, ta? Não precisa fazer nada em escala muito precisa, nada disso. Ok?
Aluno: [...]
Professor: Isso..., mais ou menos o eixo que vocês têm similar àquela parede ali. Na parede tem um eixo mais ou menos similar, demarcando o zero, o início do sistema de coordenadas e o que nós pedimos agora, é que vocês façam nesse papel de gráfico, a representação matemática de probabilidade dos projéteis que chegarem nesta parede do fundo. Só isso. Então, nós pedimos um gráfico que mostre a probabilidade desses projéteis se distribuírem naquela parede do fundo. Não é pra desenhar o projétil agora no papel de gráfico. É um gráfico de probabilidades de distribuição dos projéteis na parede.
Aluno: ...o zero do gráfico na parede aqui [...]
Professor: Exato. Você dividiu o gráfico na mesma simetria né?
Aluno:
Professor: É... sim... você não precisa... a escolha é sua. Você não precisa... Em algum ponto desse gráfico você pode supor essa equivalência de espaço que você está me pedindo... mas a escolha é sua. Por isso que não precisa ter muita escala, nem muita distância, nem nada...

Aluno: Precisa por o nome no gráfico?
Professor: Por favor.
Professor: Bom, o que nós pedimos pra vocês agora é o seguinte: é que vocês agora, no verso desta figura escrevam um texto justificando... explicando o que vocês fizeram, as representações que estão aí. Não é pra escrever que o professor pediu... Justifiquem né... use argumentos para justificar porque vocês fizeram estas representações tanto no esquema físico da representação experimental, quanto no papel de gráfico. Usem o verso da figura. Aliás... usem o verso da figura que aí vocês escrevam à vontade. Justifiquem fisicamente porque vocês fizeram essas representações. Escrevam à vontade ok?
Se preferirem façam até no papel sulfite que assim vocês podem consultar a figura à vontade, enquanto elaboram o texto.
Não esqueçam por gentileza do nome no texto, pra gente localizar né... Não economizem palavras...
Aluno: Fala sobre o gráfico também?
Professor: Sim, fala sobre o gráfico também, neste texto vocês coloquem justificativas das outras apresentações, tanto no arranjo experimental quanto no gráfico, porque que a gente pede isso? Porque muitas vezes a gente pega os desenhos de vocês e nós entendemos que vocês quiseram dizer alguma coisa, quando no fundo vocês quiseram dizer outra... Então, fazendo a redação do texto explicando o porquê você fez, a gente capta exatamente a idéia que vocês tiveram. Guardem um pouco este material aí, porque eu vou distribuir um novo... A NMM vai recolher para gente dar uma examinada rápida, depois se for o caso, vocês vão receber de volta este material, ainda hoje.
Professor: O sistema agora que a gente vai trabalhar e muito parecido com o sistema anterior, novamente vocês tem aí a metralhadora... a mesma, um sistema com... e uma parede com duas fendas e atrás desta parede com duas fendas a mesma parede que absorve o projétil e o que nós pedimos nesta representação é a mesma coisa que pedimos para a primeira representação, então a distribuição de projéteis na parede. Nós pedimos para vocês que façam a distribuição de projéteis na parede, a movimentação da metralhadora é idêntica ao caso anterior, depois nós pedimos uma outra representação matemática dessa distribuição de projéteis na parede no papelzinho. ok?
Aluna: O centro
Professor: Oi, assim elas estão com a mesma distância em relação ao centro. Não sei se a figura, a vista superior ficou um pouquinho cortada em baixo, mas é a mesma distância. Essas fendas se encontram à mesma distância com relação ao centro de coordenadas de sistema. Bom..., como a atividade foi muito similar à primeira que nós fizemos nós deixamos opcional para vocês, se quiserem fazer um texto sobre..., justificar essas representações que vocês fizeram agora. Podem escrever no verso da figura, quem quiser justificar a nova representação... fiquem a vontade.
Bem, algum de vocês gostaria de explicar para o resto do público as representações que fizeram, quem se habilita? Elas estão aqui, a primeira e a segunda está na mão de vocês, ninguém se habilita para explicar? Eu vou fazer o seguinte... vou mostrar três representações para vocês, temos esta representação aqui..., nós temos esta e esta representação, o mesmo fenômeno representado aqui de três maneiras que vocês vêem, que semelhança e diferenças tem essas representações? Se alguém quiser justificar a sua representação, porque ela foi citada aqui, fica à vontade.
DFG: Esta tem a área menor né...
Professor: Esta aqui? Será que o dono dessa representação não gostaria de explicar ela?
Professor: Fala para nós aí DFC
DFC: ...essa região com maior probabilidade de achar e a coincidência com a fenda da parede anterior, onde os projéteis podem passar e atingir a parede posterior nos outros lugares que não tem fenda não tem como a bala atingir a parede posterior...
Aluno: Neste gráfico para mim, mais embaixo da barreira, tem maior abrangência em x, já em cima da barreira tem a menor abrangência em x.
DFG: Não, mais aí... pelo o que dá aqui não é a altura da barreira ...vai se aproximando da barreira em x e vai aumentando a probabilidade de acertar..
DFJ: Entendi que pode chegar à posição da fenda, só tem como afetar uma reta de projéteis, porque ela vai se comportar como partícula, então ela vai estar numa linha reta. Se ele virar um pouquinho, acho que o ângulo já vai fazer com que ele pegue na primeira parede e não vai atravessar, eu acho que a probabilidade só de estar nesta região...
Alunos falam juntos e não dá para entender...
DFG: A largura e a espessura também...
DFJ: Já não é tão considerada já que o professor falou que não atravessa de jeito nenhum, o projétil.
Professor: Não atravessa a parede.
DFJ: Na primeira parede?
DFG: Mais... e você tem uma fenda assim..., na parede muito grossa... ela não vai passar para o outro lado...ela tem um espaço ali de intervalo que ela passa...
[...]

DFJ: Talvez eu discorde... eu discordo disso porque a mobilidade de se movimentar é igual de cima para baixo.
DFG: Então, é o que eu disse..., se fosse o tamanho da barreira...
DFG : Depende do tamanho... vai chegando perto da distancia x, por exemplo, quanto mais perto o tiro passa perto da barreira... se ele passa no meio da fenda...
DFJ: mas que altura... mais o menos...?
: Quer dizer que no cantinho da barreira mais próximo da fenda seria melhor a probabilidade?
Aluna: No centro da fenda, não o tiro de frente... não entendi, dentro da fenda que você fala está de frente, por exemplo... essa mesa é a fenda, vai estar aqui bem no centro a maior probabilidade?
Aluno: A fenda está aqui...
Aluna: ... ela vai estar deslocada.
DFG: ...ela tem espaço dos lados, no centro da fenda vai ser uma maior probabilidade...
Não se entende a fala do DFG
Aluno: Então eu discordo se a bala pode passar tanto mais perto da primeira fenda, a probabilidade ou não é a mesma para mim, passando na fenda seria o gráfico aqui em baixo...ela está passando da fenda, então para mim seria igual.
Alunos falam juntos.
Aluno: Você está levando em conta um movimento aleatório, você atirando na parede...
Aluno: A gente vai considerar o centro com a maior probabilidade...
Aluna: Você diria valores de X que se comportasse como onda talvez e como partícula ela vai ter uma...
Aluno: Você tem que ver o seguinte: a probabilidade de você ter uma partícula né, então você tem uma partícula...
Aluno; Aonde deixa de se encontrar naquela região é uma região que passa a fenda..., passou por ali, se encontra ali e agora ela está mais para lá, mais para cá... aí num compete
Alunos falam juntos.
DFG: Se você faz uma pesquisa...
Professor: Só tem uma pessoa que não falou ainda.
Aluna: Eu concordo com o Mateus, eu acredito que a parede vai ser atingida em apenas uma posição, embora esteja próxima a fenda... pela largura da fenda ela não chega tampar... se ela passar ela vai atingir a parede... não vai ter essa dispersão
Professor: Mais alguém quer falar?Eu vou adicionar um problema para vocês aqui que o
DFG trouxe. DFG você falou bastante das propriedades da fenda, que propriedades que você falou da fenda?
DFG: Falei da espessura da fenda... certo, não da altura...Vai atingir pela espessura e a espessura da primeira barreira, ou seja, a largura da fenda e a espessura da parede dela..
Professor: De que maneira esta espessura da parede que contém a fenda, pode interferir no resultado?
DFG: Vai ter menos espaço para as balas passarem... se tivesse um feixe X, e dobrasse a espessura da parede por exemplo vai ser x/2...não sei se é essa a equação, mas vai ser menor... se ela estivesse alinhada com o feixe a espessura da parede não interfere.
Aluno: Quanto maior a espessura as balas [...]
Professor: Se a parede que tem a fenda tiver a capacidade de ricochetear projétil, isso muda alguma coisa, de ue maneira?
Aluno: ... a probabilidade é que tem toda parede atrás, dependendo do ângulo desse ricochete.
Aluno:Se a fenda for muito larga e a parede for muito larga a probabilidade é para parede inteira...
Professor: De que maneira essa nova situação que eu coloquei de ricochetear pode conduzir uma nova modificação desse resultado que vocês colocaram aqui? Expliquem melhor porque que a parede toda seria preenchida... como foi uma afirmação de um de vocês aí.
Aluno: não dá para entender...
DFG: Se ela for igual um espelho, por exemplo, e tiver igual angulação [...]
Professor: Alguém quer acrescentar algum dado a mais?
Alunos falam juntos...
Aluno: Agora você tem novos picos em outros lugares...
DFG: Acho que vai cobrir a parede inteira...
Aluno: Se tiver somente uma fenda mais à esquerda, a probabilidade, você tem como ricochetear desse lado, mas dependendo da largura da parede aqui, e dá para ricochetear aqui, aqui e voltar por esse lado, aqui você só tem a probabilidade, depende da largura da parede, tem maior probabilidade de encontrar, de ter [...] desse lado...
Alunos falam: Vai depender da largura também.
DFG: Fala...
Aluno: Bate e volta, bate e volta...
DFG: A tendência dela é manter o trajeto dela né, mas ninguém garante que não vão voltar.

Professor: Alguém mais quer falar? Muito bom... muito bom. Agora acho que pode recolher né NMM? E nós vamos ver uma pequena animação agora, desse problema, vocês querem fazer alguma discussão em cima do problema de duas fendas, levando em conta que pode ricochetear o projétil?
DFG: ela vai preencher a parede...
Professor: Vamos ver uma pequena animação sobre a probabilidade, enfim o que pedimos para vocês não é nada complicado e nós trouxemos aqui um esquema, uma figura, um experimento... e vocês estão tentando antecipar o resultado desse experimento de sala de aula,... mas como eu não consegui transportar as metralhadoras até aqui, a gente propõe que vocês apenas imaginem o resultado. Então, se vocês estão exercitando aqui, é um tipo particular, que se chama experimento pensado antecipatório, porque nos estamos procurando... antecipando o resultado experimental em cima de uma coisa que nós não fizemos efetivamente. Este tipo de recurso é muito utilizado no ensino e aprendizado de ciências,... mais que isso... ele é um recurso extraordinário para os cientistas quando estão lidando com situações novas. Pra dar um exemplo para vocês, uma das primeiras pessoas que inaugurou o uso de experimento pensado foi Galileu, então Galileu pra justificar suas argumentações físicas, ou seja, do comportamento do movimento... ele propunha aos cientistas que imaginassem um plano inclinado, uma esfera caindo, enfim situações nas quais, os cientistas tinham que colocar seus conhecimentos físicos... seja lá como for, dentro daquele experimento e a partir dali apreender algumas coisas. Em física tem um experimento clássico que é o experimento "O balde de água de Newton", Newton imaginava um balde de água preso por um corda no espaço e aí esse balde estava cheio de água e era colocado para girar. Gira, gira e solta o balde e ele começa a girar e a pergunta é: O que acontece com o menisco no balde de Newton? Eu vou dar um outro experimento pensado muito interessante para vocês brincarem e refletirem sobre o conhecimento de física de vocês. Vamos imaginar que nós temos uma balança analítica e um béquer de boca para baixo no prato da balança, só que pousado no prato da balança dentro do béquer. O béquer está emborcado e tem uma mosca. A balança está ligada e existe uma certa massa, pergunta-se: O que a balança vai registrar quando a mosca começar a voar lá dentro... sair do prato? Este é um experimento pensado que exige que vocês coloquem os seus conhecimentos de física em prática para tentar compreender, avaliar o quanto a gente está aprendendo com os conceitos que estão envolvidos.
Um outro experimento pensado muito interessante é o seguinte: todos vocês aprenderam que os corpos são atraídos para o centro da terra, então vamos imaginar um experimento pensado... este é um experimento que não dá para fazer nem comprovar, vamos imaginar um furo aqui na terra que passe pelo centro da terra e vai para o outro lado do globo, então... um poço muito profundo que vai atravessar a terra inteirinha e vai até o outro lado. Muito bem... eu vou no poço e solto uma pedra. O que acontece com essa pedra? Vai na direção do centro? Como chega no centro, ok? Então, este é um experimento pensado, enquanto vocês pensam, vamos ver uma animação. Essa animação, nós pegamos na internet..., ela é uma animação para compreensão de eventos quânticos... ela começa a rodar com um personagem super herói quântico, vamos ver só um trecho dela.
Professor comenta às vezes do filme mais não da para entender
Na essência foi o que pedimos pra vocês representarem, e vocês não apresentaram dificuldades. De uma forma mais detalhada veremos um texto [...]
Professor: Nesta primeira parte do texto vamos fazer uma leitura e vamos ver o que a gente consegue abstrair desse texto.
Comportamento quântico e mecânica quântica.
Mecânica quântica é a dispersão do comportamento da matéria e da luz em todos os seus detalhes e em particular os seus fenômenos em escala atômica. Em escala reduzida, a natureza se comporta de modo completamente diferente daqueles que estão habituados. No mundo quântico as coisas não se comportam como ondas, nem como partículas ou bolas de bilhar nem como massas presas pelas molas ou conhecimentos físicos que não são familiares. Enfim, as coisas se comportam de modos jamais vistos.
Newton imaginava que a luz era constituída de partículas até que se descobriu que ela se comportava como uma onda. Mais tarde, contudo, no começo do século XX foi descoberta que de fato a luz se comporta às vezes como partícula. Historicamente se pensava que o elétron, por exemplo, se comportasse como uma partícula até que se descobriu que um dos aspectos é ele se comportar como uma onda. De fato, ele não se comporta nem como uma coisa nem como outra, no entanto, o elétron também se comporta como uma luz e o comportamento dos objetos anatômicos sejam eles elétrons, prótons, nêutrons é similar exibindo ora comportamento ondulatório ora comportamento corpuscular. Todos eles são partículas, de modo que aquilo que nós aprendemos sobre as propriedades dos elétrons, que vamos examinar detalhadamente aqui também, se aplica às demais partículas, incluindo fótons de luz. Durante o primeiro quarto do século passado o acúmulo gradual de informações do comportamento atômico em pequena escala, trouxeram os indícios de como os pequenos objetos se comportam e acabaram de gerar uma dificuldade crescente na sua modernização e só foi resolvida nos anos 1926 e 1927, por Bohr e Schrödinger ao escreverem de modo consistente o comportamento dos objetos quânticos.
O comportamento em escala atômica é tão diferente do usual que todos temos dificuldades de se habituar ao mesmo, sejam leigos ou físicos, mesmo os especialistas não têm o modelo da forma como gostaria e isso é perfeitamente razoável, porque toda experiência e intuição humana se aplica à objetos grandes. Sabemos como

os objetos grandes se comportam, mas as coisas em escala muito pequena não se comportam de modo similar e assim no universo da quântica, as coisas têm que ser aprendida de maneira exclusivamente abstrata ou imaginária, sem qualquer conexão com as nossas experiência direta. Neste texto abordaremos esse estranho e misterioso comportamento.
Comentário: Professor
Não vai ser hoje, mas nos próximos trabalhos vamos entrar nos objetos quânticos.
Texto
Estivemos examinando o fenômeno que é impossível, absolutamente impossível ser explicado de qualquer forma clássica, e que comporta a essência da quântica. Esse fenômeno comporta de fato, o único mistério da mecânica quântica, não é possível compreender porque o fenômeno ocorre apenas e tão somente como ele sustenta, contando como ele ocorre, teremos abordado a peculiaridade básica de toda mecânica quântica.
Comentário
Na realidade dos fatos do texto abordado da quântica, que ao longo vamos examinar nas atividades, ele não vai começar com o problema quântico ele vai começar como começamos hoje, com problema clássico examinando o problema do projétil ok? Ele começa com experimentos nos projéteis.
Texto
Para tentar entender o comportamento quântico dos elétrons vamos confrontar como os comportamentos de partículas mais apropriadas tais como os projéteis numa metralhadora e como o comportamento do sistema ondulatório tal como onda na superfície da água. Considerando inicialmente o comportamento dos projéteis em um dispositivo experimental como aquele mostrado sistematicamente na fig. 1.1.
Nós temos um arranjo aqui muito similar à vista superior do trabalho que fizemos agora. Nós temos aqui uma metralhadora atirando projéteis pra todos os lados numa parede que contém duas fendas e por fim um anteparo aqui em baixo no meio ok?
Podem acompanhar a figura do texto aí. Então o arranjo mostra uma metralhadora que dispara continuamente projéteis de modo aleatório, tal que ela se dispersa em uma outra faixa angular como mostrado na figura. Frontal à metralhadora, há um aparelho blindado com duas fendas verticais largas o suficiente para obter a passagem do projétil.

Na figura deslocamento do detector paralelo ao eixo X que mostra verticalmente. Localizaram o detector ali na parede? Ele sobe e desce e capta os projéteis, anteriormente a probabilidade da chegada de um projétil sobre um anteparo em uma posição qualquer sobre o eixo X é proporcional quando um projétil alcança um detector e nessa figura essa probabilidade está representada por P1,2. Então na fig.1.1 C. do gráfico mais a direita, a curva que representa o projétil que alcança o detector ao longo de toda, essa parede ai está representado por P1,2 uma vez que o projétil vem tanto da fenda 1 quanto da fenda 2.
Pois bem, tem uma pergunta, porque será que P_{12} tem seu Maximo em X e não na frente de fenda 1.2, respectivamente? Sem a leitura do texto algum de vocês é capaz de contar isso para mim?
Aluno fala, mas não dá para entender.
Professor repete:..então X é igual a 0? Ela absorve as partículas no canto das fendas e são ricocheteadas pro centro...
Alunos falam no fundo.

Professor: Mais algum comentário? Pois bem, podemos entender esse fato se fizermos novamente nossos experimentos depois de cobrir a fenda 2, repetindo essa experiência e cobrindo a fenda 1. Então vamos examinar com calma a situação agora com uma das fendas abertas que foi a primeira atividade que a gente fez aqui. Quando a fenda 2 está coberta, os projéteis podem passar somente através da fenda 1 e obteremos a curva indicada por P_1 na parte B da fig. Nós fechamos a fenda 2 e obtemos a curva P_1. Localizaram P_1? Então como era de se esperar o máximo de P_1 ocorre para o valor de X que está em linha reta com a metralhadora e a fenda 1. O que esta frase esta nos dizendo? Que o máximo de P_1...
Aluno: No gráfico B está avaliado o gráfico 1 com as fendas e no 2 está avaliando as duas fendas...

Professor: Aonde está o máximo da curva P_1?
Aluno: Em linha reta.
Professor: Se a fenda... ok? Quando a fenda 1 está fechada conseguimos a curva simétrica P_2 indicado na fig... que é a distribuição de probabilidade para os projéteis que passam na fenda 2. Comparando as partes b e c da fig1.1 encontramos importante resultado P 1,2 = P1+ P2. Todo mundo concorda com esse resultado? P 1,2 = P1+P2. Bem, as probabilidades simplesmente se somam, o efeito com ambas as fendas abertas é a soma dos efeitos em cada fenda aberta separadamente. Chamaremos esse resultado, uma observação de não interferência por um razão que será explicada mais tarde. Conclusão importante: até o momento, projéteis chegam em unidades inteiras e sua probabilidade de chegada é uma somatória simples das curvas P_1 e P_2, não exibindo padrão de interferência.

Comentário
Então eu vou convidar vocês para um debate um pouco mais aprofundado. Alguém quer falar alguma coisa do texto fazer algum comentário, alguma dúvida?
Aluno: [...]

Professor: Por que no eixo Y vertical é uma probabilidade similar à representação de vocês. Volto a falar, não é o certo ou o errado que está em jogo para vocês, mas vamos tentar tirar mais algumas informações dessa figura que está colocada aqui e que o texto não explica. Será que em qualquer circunstância, a soma das duas curvas vai ter máxima intensidade na posição x = 0? Será que em qualquer situação, qualquer arranjo experimental vai redundar uma intensidade máxima em x= 0 da curva P_1 P2 mais à direita. Neste caso, a intensidade máxima deu em x = 0, será que tinha que ser sempre assim? Do que será que depende essa posição de máximo como e que depende alguma coisa, como é que foi criando esse máximo?
DFC:[...]
Professor: O quê que a curva P_{12} é com relação às curvas P_1 e P_2 ?
Aluna: Estaria interferindo construtivamente.
Professor: Tem interferência neste experimento?
Aluna: fala, mas não da para entender.
Professor: o que a curva P_{12} é das curvas P_1 e P_2.
Aluno: P_{12} representaria como se fosse uma só , somaria as 2 e faria uma só...
Professor: Então P_{12} é o quê?
Aluno: Soma das 2.
Professor: Ficou claro isso para vocês?
Então com base nessa informação graficamente olhando para essa fig.vocês percebem como é feita essa soma olhando para essa fig.independente de uma equação que tem aí igual a P_1 P_{12}, por que no final das contas, no centro fica maior do em outras regiões, observando a fig.?
Alunos falam juntos...
Professor: Agora vou dar outro dado pra ver se eu consigo ajudar um pouco mais vocês.
O que acontece se as fendas estão a uma distância uma da outra, bem no centro? Vamos admitir ex; eu e a Ângela somos o centro do arranjo e temos duas fendas, o que acontece? Será que essas curvas aí ou pelo menos a curva P_{12} ou a P_1 ou só a P_2 ou as duas ou as três, vão mudar se separar muito as fendas, o que vocês acham? Olhando para esse arranjo aí agora, então se essas curvas foram construídas essas duas fendas foram em uma determinada posição, o que acontece se eu afastar elas uma da outra, simetricamente com relação ao centro?
Alunos falam juntos
Professor: E a soma das duas, o máximo de intensidade vai continuar sendo x = 0?
Alunos: Não
Professor: Então este máximo de intensidade está em x = 0, mas não é sempre que está acontecendo isso, por causa do que?
Aluna: Das posições das fendas
Professor: Então veja: este resultado pode ser mudado em função de afastá-lo ou aproximá-lo das fendas, e o que acontece no gráfico aí em P_1 e P_1 olhando este gráfico B da figura. O Fernando até já falou... o que acontece com o gráfico Fernando? Os gráficos também se deslocam, então o que acontece com o trecho do meio do gráfico?
Aluno: começa a diminuir.
Professor: compreenderam esta questão toda.
Continuação no dia 20.10...

ATIVIDADE – SISTEMA COM ONDAS
Data : 12/ 09/ 06 Turma II

Professor: Boa noite a todos né..., Mais uma vez nós agradecemos a presença de vocês aqui, o fato de ter vindo novamente todo mundo que tava presente na atividade da semana passada, mostra o quanto vocês realmente se comprometeram com o trabalho que a gente tá querendo desenvolver, e, então antecipadamente a gente agradece de novo, por poder contar com vocês. A DFP acabou de perguntar agora há pouco, de um terceiro encontro. Vai haver um terceiro encontro, que é onde... esse terceiro encontro é realmente um encontro chave pra essa proposta didática que a gente tá querendo estudar né, avaliar, e, lembrando mais uma vez que o direito de imagem de vocês e as gravações estão protegidas no sentido de que a gente não vai jamais divulgar esse tipo de material sem autorização de vocês, e identificando-os, quer dizer, quando agente faz esse tipo de divulgação, na dissertação, na tese de doutorado, no caso da Neide, é uma divulgação que tem que ser feita sem que vocês sejam identificados nominalmente, OK?
Bem, pra essa segunda atividade nós vamos fazer uma coisa bastante semelhante com a atividade da semana passada, que é ainda um experimento com as fendas, no entanto, nós vamos ter uma novidade aí, experimental... que é... a entidade com o qual nós vamos trabalhar hoje.

Professor: Bom, vocês têm aí, alguma coisa... um arranjo experimental. Alguma coisa é até similar àquilo que nós vimos na semana passada, mas na essência nós temos aquilo que nós podemos chamar de um tanque de ondas, agora. Uma espécie de uma cuba que vocês estão vendo aí... mais ou menos na metade dessa cuba tem novamente uma parede com uma fenda. Do outro lado, além dessa parede com a fenda existe uma superfície detectora de ondas. OK? Antes dessa parede com essa fenda, nós temos um gerador de ondas. Um circuito, um dispositivo qualquer que é capaz de gerar uma onda que vai se propagar sobre a superfície desse líquido como vocês estão vendo aí, em direção à fenda. Novamente, no canto inferior, direito, nós temos a vista superior dessa representação que está aí, né... e o que nós queremos, vocês já sabem. Nós queremos que vocês representem, o que vai acontecer com essa onda quando colidir nessa parede que tem a fenda.

Aluna: Pode fazer já?
Professor: Sim
Aluno: Professor! Tem líquido dos dois lados?
Professor: Tem líquido dos dois lados, aí no fundo vocês conseguem ver o líquido, a linha do líquido sobre a placa... a superfície detectora.
Aluna: Eu não sei como desenhar...
Aluna: Pode usar a régua?
Risos
Professor: Terminado a representação, segurem o papel com vocês, ok?
Aluna: Professor! Tenho uma figura com duas fendas... tá com defeito... (risos). (7:33)
Aluna: Ih! A minha também tá com duas fendas...
Professor: Quem estiver com duas fendas, guarda...
Os alunos que receberam figuras contendo duas fendas, receberam agora a figura com uma fenda apenas.
Comunicação (não dá pra entender)
Risos...
Professor: Pessoal... terminaram essa representação? (11:00min.)
Professor: O que nós vamos pedir prá vocês agora é a mesma coisa que pedimos na atividade anterior. Vocês vão receber um papel de gráfico, tá... Então, vamos pedir agora, a mesma representação que nós pedimos na atividade passada. Vocês têm o papel de gráfico, aí... esse papel de gráfico...
Professor: Vai para a lousa e faz uma representação (mostra a representação da escala x). E nós queremos que vocês representem nesse gráfico, a probabilidade... da incidência da onda naquela superfície detectora de ondas. Ficou claro? Então, o gráfico pede que vocês representem a probabilidade... de distribuição das ondas, nessa superfície detectora de ondas que vocês têm aí.
Aluna: Professor, eu não tenho papel de gráfico...
Professor: Papel de gráfico? A logística hoje está completamente comprometida... Registrem seus protestos... nós temos um site de atendimento consumidor, on-line...
Risos
Aluno: O que é esse x?
Professor: Esse x equivale a esse eixo x de distância que você tem aqui. Dá uma olhadinha no seu desenho, então, o eixo x que eu coloquei aqui (lousa), ele corresponde a esse eixo x que orienta o espaço na superfície detectora de ondas... ok?
Tempo para representação gráfica... (13:38min)

Professor: Quando vocês terminarem a representação, não esqueçam de colocar, no gráfico, o nome de vocês e evidenciarem a qual sistema, a qual experimento corresponde. Nesse caso uma fenda. [...]
Aluno: Professor, no final do trabalho você vai explicar... o que você estava avaliando.
Professor: Claro... é importante para isso, que vocês estejam aqui na semana que vem.
Professor: Bom pessoal, agora, eu vou pedir para vocês representarem, perdão... escreverem, agora no verso da figura... Na atividade passada vocês fizeram na frente da figura e o texto ficou um pouco restrito, ta. No verso da figura... expliquem o que vocês fizeram e como vocês justificam as representações. Ok? (17:40min)
Alunos: [...] (18:05min)
Professor: Ok, turmaaa? Bom, então a gente vai...
Professor: (26:38min) Pessoal, novamente nós pedimos: lembrar nome, né, no trabalho. E agora tem o mesmo esquema que vocês estão percebendo aí. Só que essa parede intermediária agora tem duas fendas... Novamente, a gente está aí diante de um sistema com duas fendas, dentro agora de um tanque de ondas... e a gente pede, novamente, a representação do que acontece na superfície detectora de ondas, ok? No momento em que nós temos agora, duas fendas...
(27:16min)
Professor: Já representaram?
Professor: (32:54min) Pessoal! Vocês receberam também mais um papel de gráfico para fazer agora, a representação da probabilidade de distribuição das ondas na superfície, para um sistema com duas fendas, agora, ok? Então, novamente um sistema de eixos (x na horizontal e probabilidade na vertical). Representem então, a distribuição de probabilidades que a gente percebe na superfície detectora de ondas.
Comunicação entre os alunos...
Aluna: Professor! É um líquido, né? É um líquido normal?
Aluno: Líquido normal?!
Professor: É um líquido...
Professor: (37:28min) Pessoal, nós pedimos novamente que vocês, para o sistema com duas fendas, nós pedimos um texto explicando o porquê da representação que vocês fizeram aí, no verso da figura.
Professor: (41:48min) Pessoal, não sei se eu fui claro na explanação do sistema do tanque de ondas, mas dentro do tanque tem líquido e tem um sisteminha que gera onda nesse líquido. Perceberam nessas ondinhas que estão representadas ai que tem líquido que se propaga em direção à fenda. Perceberam isso? Estou esclarecendo porque não sei se isso ficou claro né, e agora que ficou mais claro pra vocês, se quiserem fazer a representação pensando agora na concepção de líquido, ok. [...]. (42:17min).
Professor: Bom, alguém de vocês gostaria de iniciar o debate das representações aí, da mesma forma que fizemos na aula passada. Alguém se oferece aí pra iniciar?
DFP: Eu me ofereço.
Professor: A DFP se oferece...
Risos...
DFP: Ah! Não vou mais falar...
Professor: DFP, não leve a sério a molecagem...
DFP: Oh! Eu acho que a onda vai chegar na superfície detectora... em toda superfície detectora... em ambos os casos. No primeiro eu acho que eu tenho o espaço da fenda, como é um líquido, ele está vindo aqui numa onda, daqui sai um pedaço e ele vai se propagando, vai aumentando e vai chegar inteiro, vai bater inteiro no detector. E a outra vão ser duas ondinhas assim, vai se acoplar com a outra onda e vai bater também inteira.
Professor: Quer mostrar sua representação?
DFP: Ah, não dá pra enxergar. Eu não fiz o caminho, eu só fiz o caminho na vista superior.
Aluno: Primeiro, eu acho que depende da distância de uma fenda pra outra pra ver se ela vai conseguir chegar inteira. Depende da distância da onda ou da fenda até a outra pra ver se a onda...
Aluna: O que eu percebi é que ficou muito curta, à distância, ou também ficou muito forte a onda, ou talvez chegue só um pedaço, mas se ela for voltar, a onda vai voltar e ela vai bater na outra parede e vai voltar... Assim... Outro aluno interfere...
Aluno: Eu pensei que a onda interfere, então vai ter interferência construtiva, que os dois vão estar... na hora que chega na fenda, elas vão passar juntas, então ela vai estar no mesmo, sei lá, mesma fase, então a interferência vai ser construtiva e vai ser só no caso desse centro aqui, ó. Nessa aqui, essa onda continua normal e aqui vai ser ao contrário, no caso a onda vai ser construtiva e se bater lá e a amplitude dela vai ser maior nesse caso...
Aluno: Eu acho que a onda vai chegar num único ponto ao longo do eixo x, é uma onda mecânica e essa altura que vai ser o eixo y vai depender da viscosidade do líquido e da amplitude da onda que saiu do gerador.
Professor: O público está ansioso...
Aluno: Eu acho assim, no primeiro caso, quando a onda vai passar pelo furo aqui...
Professor: Você não quer mostrar sua figura para os demais...
Aluno: Eu acho que vai passar pela fenda e vai se propagar como se tivesse nascido nessa fenda. Aí assim, vai sair em círculo né, e o meio assim perpendicularmente em direção à fenda vai ser um pouco maior a amplitude lá

no anteparo porque ela tem maior energia, não sei... Aqui nas partes laterais assim, vai ser, menos amplitude... no anteparo. No segundo caso, entre as duas fendas, vai ter maior amplitude porque a onda vai ser construtiva, aqui há interferência é claro, vai depender da distância entre as duas fendas como a gente viu na outra aula, então vai ser construtiva. E entre as duas fendas vai ser maior a amplitude lá no anteparo, né por que vai ter maior energia e tudo mais e aqui nas laterais vai ser menor...
Aluno: Eu acho que não pode ser comparada com a aula passada, porque as ondas são de natureza diferente. Uma é eletromagnética e a outra é mecânica. A outra lá era luz né.
Professor: A aula passada era um projétil.
Aluna: Eu acho que perto das fendas vai ter uma certa área que a onda vai atingir um pouco pra lá da fenda, um pouco para o outro lado... que vai ter uma certa intensidade e depois que vai se afastando, quanto mais vai se afastando, vai diminuindo a intensidade dessas ondas... tanto na primeira quanto na segunda. Na que tem duas fendas vai ter uma certa, vai ser meio que periódico, assim. Então, é a mesma intensidade, mais ou menos... que vai ter um pouco pra lá da onda, vai ter no meio e depois um pouco pra lá da outra fenda. Já a que tem uma fenda só, vai ter intensidade, ali na amplitude que pega da fenda e depois vai diminuindo conforme vai se afastando da fenda, quando a onda se propaga.
Aluno: Eu acho que dá pra representar melhor nesse desenho aqui, nessa vista de cima aqui. Só não vai dar prá ver é o eixo y, que no caso vai ser maior aqui, na direção da fenda. E aqui também vai ser aqui, entre as duas fendas...
Professor: Mais alguém?
Professor: DFN, quer comentar sua representação, DFN?
DFN: Não, professor. Está muito ruim.
Professor: Por que está muito ruim?
DFN: Então, eu tinha pensado, mas pensei de maneira errada. Eu acho. Mas eu acho que concordei com o da DFP, depois. Acho que vai ter um máximo, uma amplitude máxima no meio, no caso da primeira fenda. Depois vai diminuindo porque a onda que vai bater na parede vai meio que morrer. E a que passar pela fenda vai continuar a ter amplitude, mas ela vai perturbar ainda o líquido que está em volta dela... então o que tiver no centro vai ter máxima amplitude e em volta vai ser mínimo, vai diminuir a perturbação. Porém, aqui eu coloquei essas duas aqui, que não existem, porém se eu fosse representar de novo... eu representaria só aqui, ou seja, um máximo e depois ia diminuindo a amplitude dessa onda... e essa daqui também, mas eu coloquei o máximo aqui... só que aqui eu colocaria aqui menor, porque essas duas ondas aqui, considerando essas duas fendas... diminuindo... e aqui um pouco de cada uma, então ficaria aqui.
Professor: DFF...
DFF: Eu pensei assim: No caso da primeira fenda eu não fiz ela redondinha, mas ela passa, vai ficando né... eu fiz elas formadas a partir daqui, na primeira fenda, era mais junta e vai... ficando mais espaçado, perdendo força até atingir o anteparo, na superfície detectora. E aqui, eu pensei que ela na hora de formar, ela teria uma força maior que ia ficando mais juntas e chegariam com uma força maior aqui.
Professor: Gostaria de ouvir a DLL. Você poderia se manifestar, DLL?
DLU: Então, eu pensei acho que... totalmente errado, eu imaginei que a onda fosse chegar bem no centro, elas fossem se propagando ali e que elas fossem se juntar toda no centro, só que depois, ouvindo as outras opiniões eu concordei com a DFP que ela formaria aquele, ela ficaria toda, formaria círculos aqui. Professor: - DLL: uma parábola, é, uma parábola. (*Interferência do colega: ai depende da força né?)* É, dependendo da força... não teria tanta força prá chegar no detector. É dependendo da distância de [...]
Professor: A DFM falou também? Então vamos ouvir a DFM.
DFM: Na primeira onda eu concordo com a DFP, só que será que essa onda, ela vai ter força suficiente para chegar no anteparo? Eu não sei se ela vai ter, mas a segunda eu discordo porque eu acho que elas vão se anulando assim a hora que elas começarem a... é que eu não acho que elas vão se juntar, eu acho que elas vão se anulando, porque uma vem daqui e a outra vem daqui, elas se encontram e elas se anulam...
Vários comentários
Aluna: No momento em que elas saírem pelas fendas, elas vão fazer assim, ó. [diversos comentários]
DFJ: Ah! Sim, elas chegam no mesmo tempo só que, só que [...] não, eu sei, elas estão em fase só que ela vai chegar, tipo assim no anteparo, ela vai chegar assim, não assim... (mostra a figura).
Alunos: [...]
Aluna: É, pode ser também, ela se forma assim, daí ela vai fazendo assim... (mostra a figura.). (Outro aluno mostra a sua figura.)
DFJ: É, pode ser também...
Professor: DFB quer falar alguma coisa?
Vários comentários (risos)
Aluna: Você não quer consultar os universitários?
Professor: Você quer consultar os universitários, DFA? Ainda não pode.
Professor: Quer falar alguma coisa da sua representação?

Aluna: Não, eu concordo com a DFM, de que a interferência não vai ser construtiva, vai ser destrutiva. Elas vão chegar no centro com menos intensidade, mas... na direção das fendas de maior intensidade...
Vários comentários.
Professor: Pessoal, olha! Nós vamos recolher os trabalhos de vocês, né, e agora nós vamos ver um texto, vamos dar uma lidinha num texto...
Professor: Bem, deixa eu fazer uma observação aqui, antes de ler o texto, que o DFN ou o DLL, alguém de vocês... perguntou, a gente respondeu, mas eu quero salientar que na apresentação da semana que vem, na atividade da semana que vêm, todos vocês vão ser esclarecidos exatamente, né, do porquê a gente fez essas duas atividades. Se é que não vão perceber antecipadamente por que. Pode ser que alguém de vocês percebam, afinal, o que é que nós queremos com essas duas atividades. Isso vai ser elucidado plenamente na terceira atividade da semana que vem que é efetivamente a mais importante do programa.

Professor: Bom, eu vou distribuir um texto, tão simples quanto ao anterior, inclusive é a continuação do texto do Feynman, só que agora o Feynman discute um experimento com ondas. Então, da mesma forma que na aula passada nós discutimos a atividade com projéteis, agora o Feynman vai, a gente vai fazer a leitura do texto do Feynman em que ele discute o experimento com ondas.
Professor: Então, todo mundo tem aí um texto cujo título é: "*Um experimento com ondas*". Vamos ler o texto e ver o que a gente consegue apreender com o Feynman, o que Feynman diz com esse experimento.
Professor: Leitura do texto
Professor: O nosso arranjo é levemente diferente desse, mas a gente vai ver que isso não faz diferença.
Professor: (Se reporta à figura do texto) Então... tem aí na representação, o gerador de ondas. A parede com duas fendas, o absorvedor e o detector de ondas que é essa caixinha que está aí, hachurada, que é mais escura, né. Naturalmente é um arranjo especial que nós temos aí.

Interrompe a leitura e pergunta: Ficou claro?Alguém quer fazer alguma observação acerca do texto... até o momento? Fiquem à vontade...
Interrupção: Só pra lembrar vocês P_{12} é a probabilidade de representação dos projéteis [...] ok?

Professor: Eu vou aqui abrir um espaço aqui para representar na lousa, os gráficos de projéteis que nós tínhamos na aula passada. (representa na lousa)
Professor: Alguém tem a figura, o esquema da aula passada?
(Aluno se manifesta)
Professor: Corresponde a isso?
Professor: Ok, aqui as representações?
Professor: (1:02:50) Do ponto de vista gráfico o que o texto diz pra nós... é o seguinte (representação na lousa). Nós temos a distância d_1 e a distância d_2. Sempre que a diferença entre as duas distâncias... for igual a um número inteiro de comprimentos de onda, nós vamos ter interferência construtiva, ok? Tá perfeito?
Professor: A relação matemática muda.
Professor: Observem a figura com calma, se houver alguma dúvida, a gente discute.
Professor: Nós vamos ter que nos debater muito com a matemática que tem aqui...
Professor: (1:07:29) Bem, eu quero aproveitar para gente debater um pouquinho a diferença entre a equação 1.4 e a equação 1.1, que provavelmente vocês têm aí no texto anterior, mas se eu não estiver muito enganado (lousa). Quem tiver o texto, por favor, confira. A probabilidade, no caso de projéteis, a probabilidade 1,2 é dada pela soma da probabilidade 1 mais a probabilidade 2, ok? No caso de ondas, a equação aqui, se refere não à probabilidade, mas a intensidade da onda $I_{1,2}$. E diz mais ou menos o seguinte: isto é igual ao seguintes $I_1 + I_2$ + a raiz quadrada do produto de I_1, I_2 cosseno delta. Na essência nós podemos, observando essas duas equações...
Professor: Do ponto de vista dos termos que nós temos aí, nessa... nessas duas equações, o que é que difere a equação de cima da equação de baixo? O que tem na equação de baixo evidentemente que é diferente?
Aluna: Raiz...
Professor: Raiz quadrada do termo que é produto das intensidades, cosseno de um certo ângulo delta, de uma certa variável delta... O texto diz que esse último termo mais à direita é um termo de interferência. Por que que esse é o termo de interferência? Do ponto de vista aqui, analógico, né, da nossa representação analógica. Vocês são capazes de dizer por que esse termo é o termo de interferência?
.Aluno: [...]
Professor: Como?
Aluno: [...]
Professor: Ok, mas o que é que significa esse termo ser um termo de interferência? Diga!
DFF: No primeiro caso eu tenho uma fenda separada e aqui, o que ocorre nas duas fendas é o que conta.
Professor: O que é que vocês acham? Mais complementações ao comentário da DFF.
Aluno: [...]

Professor: Sim, mas então bastou ter um termo lá e a gente já: oba! É um termo de interferência, tal. Como é que nós correlacionamos a pergunta, né. Talvez eu não tenha sido muito específico. Como é que eu correlaciono aquela expressão de interferência ao fenômeno físico?
Alunos: Não é pela diferença de fase entre as duas ondas?
Aluna: Eu acho que em partículas, elas são..., cada uma é uma, mas agora, onda, uma depende da outra. As partículas, elas..., independente se, em qual lugar elas vão... que nem estava escrito lá..., elas não se dividem, então... pode bater uma na outra que não vai destruir nenhuma bolinha, nenhum projétil. Já na onda não. Se uma bate na outra, ela pode destruir ou pode aumentar a, intensidade, não, a amplitude.
DFP: [...]
Professor: Fala DFP
DFP: [...] Vai ficar mais próxima [...].
Aluna: Ah, não tem outro termo. Interfere, interfere um no outro
Professor: Ok, interfere.
Aluna: Um termo interfere um no outro e se somam, ai se constrói...
Aluna: Interfere um no outro e são destruídos...
Professor: Ok. No gráfico que nós temos aí representado nesse texto de onda, representado pela curva $I_{1,2}$, ela exibe, que propriedade? Ou o que é que no formato dela nós podemos correlacionar a esse termo de interferência?
Alunos: Os máximos e mínimos das ondas [...] menor... chega no máximo, vai diminuindo [...].
Professor: Ok? Alguém quer complementar? Tranqüilo?
Apresentação do filminho
Professor: Bom, vamos dar uma olhada sobre o que é que o tiozinho da quântica tem a nos dizer, ou tem a nos mostrar sobre esse evento aí, né. Quem quiser falar mais alguma coisa, quem quiser continuar dando seu testemunho.
Risos
Comentários
Professor: É, agora que vocês viram a representação, é importante vocês refletirem um pouco sobre o quanto as representações de vocês se aproxima ou se afasta daquilo que vocês viram no texto do Feynman.
Aluna: Eu fiquei pensando no detector de onda, que a onda chegava e ele detectava se a onda tava chegando ou não, e não quanto à intensidade, o detector dele é diferente.
Comentários...
Risos...
Alunos: [...] Tem controle, mas... [rever] o micro apresentou problemas com o mouse e travou – comentários sobre a necessidade de reiniciá-lo.
Professor: Ok turmaaaa, nós vamos ver a segunda parte do filme. Vamos ver se tem algum elemento aí.
Início da apresentação da animação: (1:15:55h)
Repete a apresentação
Professor: Parei um pouco a cena, para vocês observarem, o evento com a onda...
Professor: Alguém fez a representação dessa forma?
Aluno: Eu fiz mais intenso no meio, depois vai diminuindo.
Aluna: Eu fiz redondinho assim, ó.
Aluna: Eu fiz, mas não fiz assim... Interferência do colega [...]
Professor: Pessoal, nós não estamos procurando saber aqui, erros e acertos de vocês. Isso é fundamental. Não estamos... Queremos que vocês tenham acertado e não errado. Têm outras características que nós estamos buscando no trabalho de vocês, que na próxima aula a gente vai elucidar, vocês vão perceber o que é que nós estávamos procurando... Então quem errou não é para se preocupar, por que não é o erro ou o acerto que interessa...
Aluno: Então, professor, mas isto daí é errado, não é? [...]
Professor: O que?
Aluno: Isso aí é errado, não é? Essa representação aí.
Professor: Não.
Aluno: Ah, mas é diferente.
Professor: Quantas fendas têm lá?
Aluno: Tem uma só
Professor: Então, se vocês querem comparar a animação com o texto... o que é recomendado fazer... Lembrem que aqui tem uma fenda e no texto vocês têm a representação da intensidade considerando de uma onda né, considerando apenas uma fenda, então compare a intensidade aí... Ok?
Repete a animação
Professor: E aí, vamos ver de novo, só aquele trechinho lá...
Repete a animação

Fim da 2ª apresentação: (1:22:15h).
Professor: Ok pessoal? Nós lidamos com duas entidades físicas. Na semana passada, com projéteis (partículas) e hoje nós lidamos com ondas. Na terça-feira que vem, a gente conta, mais uma vez com a presença de vocês, pra gente fechar, arrematar isso daí. Primeiro, para esclarecer aqui que cada uma dessas atividades da aula passada e o que é que vamos conseguir com a terceira. Comentários adicionais? Perguntas?
Comentários
Professor: Uma pergunta que nós fazemos pra vocês é se lidar com o texto, a leitura do texto e esta animação que vocês estão observando, ela ajuda a melhorar a compreensão de vocês [...]?
Aluna: Sim
Professor: Na próxima aula, pessoal, a gente vai fechar, arrematar o nosso trabalho. Antes de encerrar eu queria ais uma vez, a Neide e eu queríamos mais uma vez agradecer a dedicação de vocês por terem vindo aqui mais uma noite participar dessa atividade. Eu sempre soube né, volto a salientar que eu sabia que poderia contar com vocês e realmente vocês estão mostrando, assim, uma dedicação por terem vindo aqui, né, no período noturno e o respeito muito grande pelo trabalho que nós estamos fazendo. Sem a participação de vocês, a gente não teria como checar essa metodologia, essa proposta nova de trabalho e conseqüentemente a gente não ia saber se isso é uma coisa legal [...]. Então, vocês estão mostrando bastante respeito pelo trabalho nosso, da Neide, e a gente agradece novamente a presença de vocês, contando de novo com a presença de vocês, no possivelmente o último capítulo dessa novela, para saber quem matou... né. (risos). Se foi com a metralhadora... ou se morreu afogado nas ondas. (risos). O que aconteceu, afinal de contas com esse tiozinho aí. Ok, pessoal... mais uma vez muito obrigado. Eu conto com vocês de novo nesta sala, na semana que vem e... eu estou com sede? (risos). É o máximo que eu posso falar porque está gravando... (risos).(01:25:00)

ATIVIDADES – SISTEMA COM ON

DATA: 20/10/06 Turma II

Professor: Pessoal, boa tarde mais uma vez.

A gente agradece aqui a presença de todos né, nessa nossa atividade, lembrando uma coisa importante que nós estamos gravando tanto a voz como a imagem de vocês, mas o direito de sigilo dessa voz e imagem fica garantido pela legislação Federal que regulamenta a atividade.

Acho que a NMM comentou na atividade passa que existe uma legislação que obriga nós professores e profissionais, quando vamos desenvolver atividades fora da atividade normal de aula não prevista, principalmente uma atividade que vai ser gravada e divulgada num trabalho científico há uma legislação que nos obriga a guardar o sigilo de vocês, então é por isso que se coletamos aquele documento com a assinatura de vocês... É lógico que se em algum momento nós tivermos que divulgar, devemos manter o anonimato de vocês. O nome de vocês será preservado. No caso da imagem de vocês.

No meu entender, essa lei tem um certo exagero que significa o seguinte: significa que se nós tiramos vocês da sala de aula e eu entrego uma folha escrita aqui para vocês: O que é um ácido? Eu tenho que pedir autorização para COPEP para fazer essa pergunta para vocês. Por quê? Porque a COPEP entende que num determinado momento você pode invadir a privacidade ou afetar a moral, os bons costumes e integridade física, ou seja, preservar principalmente vocês. Fisicamente vocês. Ora, dificilmente alguém aqui vai se ofender se eu perguntar o que é um ácido, de qualquer forma a COPEP propõe essa atitude então... bem, a atividade de hoje é muito parecida com a da aula passada, no entanto, nós vamos reproduzir com algumas diferenças.

O material (esquema) está sendo distribuído

Professor: Nós pedimos novamente que vocês verifiquem todo o material, com o nome de vocês apenas. Esse arranjo que nós temos aqui, ele tem alguma similaridade com o sistema da aula passada, no entanto, algumas diferenças são evidentes. Isso aqui é uma, eu tentei representar uma espécie de cuba de onda. Não sei se vocês viram isso em uma aula de física, no laboratório de física, mas é bastante simples. Mas nós podemos imaginar isso aqui como sendo uma dessas travessas de pirex que contém água... Só que nessa travessa nós temos ali no meio do caminho novamente uma barreira contendo uma fenda e no fundo dessa, do outro lado dessa fenda, nós temos um aparelho aqui sensível à luz, Ok?

Então, as ondas que chegam aqui nessa superfície, de alguma forma são registradas aqui nessa parede e o sistema ta cheio de água. E nós vamos gerar ondas aqui nesse nível por meio de uma pequena esfera apresentada aqui. Essa esfera cai ali no tanque e gera uma onda que vai se propagar ao longo desse líquido e o que nós queremos que vocês façam agora, é representar os eventos que ocorrem no momento que a onda passa por essa fenda e alcança ali aquela superfície final que é a detectora de ondas, Ok?

Novamente, vocês têm embaixo à direita, vocês têm uma vista superior do arranjo no desenho e não está representado aqui no eixo X é uma falha minha, mas aqui embaixo vocês visualizam a orientação do eixo X, da mesma forma.

DFD: Representar aqui, ou [...]

Professor: Os dois desenhos, se vocês quiserem, tá..., o ideal é que vocês representem no desenho maior Ok?.

Ok? Compreenderam pessoal? A onda que está se propagando vai passar pela fenda. O que nós queremos que vocês representem é o que acontece nessa onda, no momento em que ela encontra essa parede que contém a fenda única.

DFG: Eu só tenho caneta, professor empresta um lápis?

DMM: O senhor quer que represente, na parede...

Professor: Você representa DMM, como você acha melhor..., procure apenas ser bastante claro.

Os alunos representando...

Professor: Então, agora é a parte gráfica né, da mesma maneira que nós trabalhamos na aula passada. Coloquem aí um eixo de referência a esse papel de gráfico que nós temos aí.

E o que nós pedimos que vocês façam é a representação matemática da distribuição de probabilidade de chegada dessas ondas, naquela superfície receptora de ondas. Então não é para gente interpretar o papel de gráfico como um sistema analógico àquele que nós representamos... Não é a parede que vai captar as ondas. O que nós queremos é a representação matemática de como as ondas vão se distribuir nessa superfície aí, é de colisão de ondas. Então, nós pedimos a representação matemática do evento.

DFU: Professor essa previsão de chegada que você fala... Não é ordem de chegada... Aonde chegaria?

Professor: Como chegaria e aonde chegaria.

Professor: Como será que é né? Mas o que será que é né? Que será essa distribuição da chegada de ondas na superfície. Reflitam bastante sobre conhecimentos que vocês já têm em termos de ondulatório, de física ondulatória.

DFG: Ou seja, [...]

Professor: Ah você detém o conhecimento. Ok?

NMM: Se não tiver também não se acanhe em se expor.

Professor: É se não tiver também, nós não estamos avaliando o conteúdo que vocês têm ou não, não é isso que a gente está aqui procurando.

Alunos fazem à representação gráfica do evento

NMM: [...] (conversa com o Professor) Ah eu não acredito!

Aluno: Professor, [...] curva de probabilidade?

Professor: Perdão. Sim pode ser de probabilidade ou alguma outra propriedade que você, que pode ser usada para representar um fenômeno ondulatório. Se você lembrar ou souber de alguma outra propriedade que possa ser usada para representar um movimento ondulatório, se quiser, por exemplo, representar intensidade, também pode.

Professor: Pessoal, agora a gente pede novamente... Vocês vão elaborar um texto para vocês justificarem as representações que vocês fizeram. É um texto livre, não economizem palavras, não procurem escrever nada em uma linguagem muito formal, pode ser uma linguagem simples, como se vocês estivessem conversando comigo, não é para colocar nenhuma formalidade, não precisa procurar a palavra mais perfeita, escrevam!

Escrevam, simplesmente escrevam porque é aquilo que eu falei muitas vezes a gente não consegue coletar a opinião que vocês têm do desenho e interpreta o desenho de uma forma que vocês não queriam representar. Então vai fugir da nossa interpretação que pode ser diferente da interpretação de vocês. A gente pega o texto,

porque no texto a gente vai procurar compreender porque que vocês fizeram essa interpretação. Ok? Então fiquem a vontade. Só identifiquem o texto como fenda 01, ou uma fenda aí, se preferirem, porque na próxima sessão a gente vai ter uma situaçãozinha um pouco diferente, que vai diferenciar os dois textos que vocês produzir... Fiquem a vontade e não economizem palavras.

Professor: Não se preocupem a gente não ta [...] a gente restringe confusão... não se preocupe DMM.

NMM: Pessoal, a dúvida é saudável.

Professor: É, a confusão é saudável. Agora vocês têm um arranjo bastante similar ao primeiro, naturalmente né... no entanto, agora de novo, essa parede intermediária tem duas fendas e não apenas mais, uma fenda. O que nós queremos de vocês é a representação do que vai acontecer com esse movimento ondulatório no momento em que essas [...] de onda alcançam as duas fendas. Algumas informações importantes né. A esferinha ela cai exatamente no centro do sistema de fendas ali, Ok? Então vocês podem perceber pela representação da parte anterior que o ponto que a esferinha cai está exatamente alinhado à posição zero do eixo X que passa pelo meio daquela parede que contém as duas fendas? Fiquem a vontade para representação.

Alunos representam as ondas

Professor: O que foi DFG?

DFG: [...] está representado alguns comentários. As personalidades das ondas [...] para uma e para outra [...]

Alunos: risadas.

Alunos: Na verdade, a probabilidade são as duas primeiras aqui... também.

Professor: As duas primeiras...?

Aluno: As duas por quê?

Alunos finalizam representação das ondas.

Professor: Bem, novamente nós pedimos que vocês façam representação matemática de como estas ondas vão colidir nessa parede segunda aí, que está depois ali dessas duas fendas... Ok?

Então queremos que vocês façam uma transposição matemática, de como vai ser a probabilidade de chegada dessas ondas ou dessa onda, que vocês representaram aí no sistema de fendas, lá naquela parede...

Então podem novamente dividir o gráfico com um eixo central vertical que representa a propriedade matemática que vocês procurarão representar. Obviamente, o eixo horizontal corresponde à distância X ali no centro do arranjo experimental...

Alunos fazem a representação gráfica.

Professor: Tudo bem pessoal? Agora eu acho que talvez seja importante vocês... no verso, perdão, (NMM interrompe).

(discussão sobre escrever no verso, mesma folha, Professor e NMM ao mesmo tempo).

Professor: Pode ser embaixo se tiver espaço, na mesma folha, ou no verso. Ah, pode ser... eu acho que nessa folha aqui, que vocês produziram o texto [...] você já desenvolveu seu texto?!

Quem não desenvolveu o texto ainda, procure nessa folha de sulfite desenvolver um texto, sem economizar palavras, justificando o porquê vocês fizeram essa representação aí, o sistema de duas fendas. Identifique as duas fendas, e podem escrever a vontade...

Alunos produzem o texto...

Professor: Pessoal, só vou dar uma passada... dar uma olhada nos resultados de vocês.

(O professor fala com eles na carteira individualmente, mas não dá para entender direito)

Professor: Então pessoal, eu vou pegar é..., alguém se habilita, se oferece para tentar... diante das câmeras do Big Brother, para explicar porque que resolveu fazer essas representações?

Professor: Se ninguém se candidatar, a gente! A gente candidata vocês aí, né. Começa pegando aqui, o DFD.

Professor: DFD, a representação de uma fenda ta aqui, né? Se a gente for olhar para a representação aqui, é... essa representação. Essa representação (ele olha nas carteiras).

Alguém se candidata..., o DFD se candidata a explicar mais ou menos... essa representação DFD. Pode usar o seu desenho né, usar essa figura aqui. E apresentar para seus colegas porque que você acha que o gráfico tem aquele aspecto que você representou lá.

Professor: [...] Mostra o papel para a turma aí.

DFD: Porque a fenda está deslocada para a esquerda [...]

Professor: Você não quer mostrar para seu público... não precisa mostrar pra mim, não. Mostra para o seu público.

Aluno: Porque ela tem [...] deslocado aqui pra esquerda [...] ela vinha formando aqui.

DFD: [...] vai fazendo, fazendo (mostra no papel) só que está quase chegando no outro lado da parede... No caso seria a probabilidade de chegada dela [...] aqui está no meio [...]

Professor: DFG!

DFG: Eu pensei mais ou menos o mesmo. Porque a onda quando ela atravessa a barreira aqui, parte dela fica de um lado da barreira e uma pequena parte dela continua..., e como ela [...] a tendência tudo na natureza é ter energia zero, ela passa a barreira [...] com uma certa energia... e a tendência dela é dissipar esta energia, ela dissipa essa energia formando ondas maiores, então ela continua a propagação como no início, ela vai dissipando, a intensidade dela depois da barreira e menor do que a primeira porque ela passou só um pedaço da onda, então esse pedaço de energia vai dissipar em todo espaço, aqui no caso, todo espaço que era coberto pela outra onda, dito inteira [...] certo? Então a intensidade vai diminuir, porém ela vai preencher todo espaço, só que a intensidade maior dela vai ser pelo lado esquerdo, que é o lado da fenda, por isso que eu fiz o gráfico assim, com a intensidade maior que a do lado esquerdo.

DMM: Eu fiz um gráfico de intensidade, pela distância de que seria a barreira, seria com maior ponto de intensidade, seria enfrente a barreira mesmo, e isso quanto mais distante de barreira, menor seria na intensidade, mas distância ela iria correr mais rápido dissipando e essa intensidade ia diminuindo.

DFC: Fiz igual ao DMM, na barreira posterior seria um ponto aliado com uma fenda então as primeiras se formariam no começo aqui, e a barriga da onda ia atingir primeiro um ponto um alinhado com a fenda onde começou a sair, começou a gerar ondinhas.

Aluna: Concordo com tudo, é bem o que eles falaram, mais ou menos isso que eu tentei representar, a intensidade sendo maior aqui na direção da fenda, nesta região aqui, não sei se vocês representaram, então nessa região aqui do lado oposto da fenda tem uma intensidade menor em relação a que esta mais próxima da fenda mais o menos isso, então a intensidade menor aqui do que não tenha fenda .

Professor: Ok. Mais alguma observação? Com relação ao sistema com uma fenda..., ok?

DMM: Talvez não seria... assim dessa forma de representação, se as ondas batessem na lateral e voltassem, já eu acho que poderia ter um pouco de interferência.

Com certeza

DFG: Professor e DFG...

Professor: O sistema não permite reflexão...

DFG: [...] aqui é uma quina [...] ia ter muita ondulação de reflexo aí [...]

Professor: [...] portanto, vocês lidaram com a hipótese de um sistema sem [...] perfeito, muito bom!

Professor: E aí no caso da 2ª fenda, o que acontece com duas fendas aí? Muda?O que muda? O que não muda?

DFG: O princípio é o mesmo, é... Só que na hora da construção das ondas aqui, eu tracei uma linha imaginária... Aqui do centro da parede, né, aonde elas vão começar a se unir e sofrer interferência uma a outra e eu acho que elas vão se juntar, a energia de uma com a outra, numa onda só, então, como são duas fendas... Uma onda se divide em duas, mais tarde elas se juntam e formam uma só.

DFD: Foi isso o que eu pensei, elas se unem... Vão sofrendo interferência uma da outra, mas conforme vai tendo espaço aqui... Se o espaço for pequeno chega duas frentes de onda. Se o espaço for um pouquinho maior vai chegar uma única onda só, elas vão sofrendo interferência.

DFG: Há uma discussão entre os alunos – não dá para entender direito.

O comprimento de onda delas vai aumentando... Conforme vai sofrendo interferência, o comprimento de onda vai aumentando...

DFD: o espaço delas vai [...] elas vão sobrepondo (???)

[...] por isso que no gráfico aí... tem que estar maior mais no centro, porque as bolinhas... (falam juntos)...

DFG: É a interferência aí se dá no centro, como é eqüidistante as duas fendas do centro elas vão se encontrar no centro, porque [...] a fenda um da fenda dois é a mesma distância do eixo [...] do eixo zero, da linha zero do eixo.

Aluno: Eu acho [...] Nesse espaço aqui... eu considerei esse espaço pequeno, essa distância razoável aqui, então, dependendo as ondas vão crescendo e os picos delas, a maior intensidade dela vai ser em direção alinhada com as fendas, então essa aqui vai gerar uma maior intensidade em direção com essa fenda e essa de cima com a fenda dela. E aí onde não há sobreposição é justamente o ponto zero, no ponto zero não tem intensidade alguma, ou seja, mais em relação à fenda, isso sim nessa distância pequena.

Aluna: É... eu procurei é... botar esse pensamento... Tendo um momento em que na posição do eixo x igual a zero [...] tem uma intensidade maior, mas tem um momento em que as intensidades, é..., será maior na direção das fendas... essa é intensidade.

Aluno: Interrompe, mas não entendo.

Aluna: [...] É o intervalo maior, é.

Aluno: [...] se tivesse uma distância maior, a intensidade no centro seria maior? Elas iriam [...]

Aluna: Não, elas iriam se destruir [...]

DFG: [...] No centro não teria nenhuma intensidade, no caso?

DFD: [...] ou seja, na 1ª fenda eu fiz a intensidade maior no lado esquerdo [...] no lado direito [...]

DFG: É..., aqui eu fiz assim [...] da onda final, elas formariam assim..., elas iam se juntando e iam formar uma onda, assim, ia juntando, juntando até formar uma onda... Então esse gráfico está por ondas. Se fosse fazer gráfico, onda por onda, ia ser assim (...) no centro a intensidade zero... ia juntando, juntando, juntando... até ter o pico.

Professor: Mais alguém queria fazer algum comentário acerca da sua representação? Tranqüilo? Então tá. Então nós vamos fazer agora o seguinte: vamos recuperar as representações de vocês da aula passada. (Conversa com a NMM).

Professor: Nós vamos recuperar, vou selecionar um desenho ou outro aqui da atividade passada, vou selecionar um desenho aqui ou outro também dessa atividade, é nós vamos debater um pouquinho as diferentes representações que foram feitas ou similaridades que foram feitas nas representações que apareceram nas representações da aula passada, com as representações de hoje.

Vamos pegar particularmente, é, vocês vão compreender claramente [...] particularmente uma representação dessas daqui, não interessa muito o autor da representação.

Professor: Ora, nós temos essa representação que é muito similar a esta representação e essas duas representações são bastante próximas. Vamos brincar mais um pouquinho as representações de duas fendas...

Professor: Então, essas três representações são bastante similares Ok? Nós vamos procurar comparar essas representações desse sistema com estas representações aqui. Vou deixar um pouco o gráfico de lado. Vamos trabalhar em cima desse sistema aqui. Bem, na realidade o que a gente procurou fazer aqui até o momento é o seguinte:

Eu propus, nós propusemos para vocês um ambiente experimental, um ambiente de um experimento que nós não estamos efetivamente executando, portanto, nós chamamos de um experimento de pensamento, ou seja, um experimento pensado, que eu comentei na primeira atividade nossa, que a gente procura antecipar um resultado. Como vocês exercem essa atividade de representação vocês estão olhando para essa figura como se fosse o próprio sistema experimental de laboratório, ok? Então, um fenômeno físico está representado aqui, certo? Depois da representação do fenômeno físico, eu peço essa representação matemática para vocês, então, fazendo isso, né, fazendo essa dupla jogada aqui, o que nós estamos pedindo para vocês?

Nós estamos pedindo que vocês façam a transposição matemática de um fenômeno físico, existem fenômenos físicos, ok? Não é isso? Como é que nós fazemos a transposição desse fenômeno físico para uma representação matemática? Isto é, utilizando uma linguagem com o qual eu posso manipular a linguagem do laboratório e eventualmente predizer resultado, concluir resultado, confirmar hipóteses ou resultar hipóteses. Então, esse exercício na realidade, ele é um exercício de transpor da representação física que é um sistema analógico que representa aquilo que efetivamente acontece no laboratório ou procurar se aproximar da representação do laboratório. Ok? Fizemos um experimento, entre aspas, em laboratório, porque ele foi desenvolvido no fundo no pensamento de vocês. Vocês procuraram antecipar esse resultado. Feito isso, segue-se a etapa de transposição matemática daquela representação física, ok? Então nós vamos pegar duas dessas, é pode ser, por exemplo, essas duas representações e a gente vai procurar, é, eu vou pedir para vocês procurarem justificar a diferenças e as semelhanças que tem nessas duas representações, ok? Então, o que é que vocês tem a dizer com relação às diferenças e as semelhanças em todos os aspectos que vocês puderam relacionar aqui, nessas duas coisas.

Podem começar os aspectos mais simples que ocorreu na cabeça de vocês... Não é para se preocupar com altas teorias científicas ou matemáticas aqui neste momento, tá?

O que tem de diferença nessas duas situações que vocês vivenciaram e que representaram?

DFG: Consideramos que os dois estão corretos, é... aqui o primeiro que a gente fez, praticamente a intensidade vai tá dividida em dois picos, né? Um de cada lado do centro e aqui... a gente vai ter, no final [...] vai ter um pico só no centro.

Professor: Por que essas diferenças?

Alunos: [...] são partículas, o que atinge lá são partículas e aqui a gente tá mexendo com ondas... comportamentos totalmente diferentes...

Professor: [...] O que é que o resto tem a concordar ou discordar do caso?

Alunos: ...

Professor: Alguma outra complementação? Quem é que pode, é, começar a elencar aqui, essas diferenças? O que nós podemos procurar que evidencia essas diferenças? A gente não precisa, não basta procurar no desenho. Tem que procurar um "bocadito" [...] também, nos esquemas de raciocínio que vocês fizeram, para fazer cada uma dessas representações...

Aluno: [...] a onda varia, a partícula já não...

DFG: A onda, ela se propaga aleatoriamente, aleatoriamente não..., ela tem uma simetria, mas a tendência dela é preencher todo o espaço e a partícula não, ela tem uma direção, tem um sentido e ela vai só vai parar onde tem uma barreira.

Professor: DMM, quer complementar? DJA? Vamos procurar desenvolver o que o DFD falou. DFD o que você falou mesmo da partícula?

DFD: A partícula, ela tem um trajetória linear, a onda não.

Professor: Ela tem uma trajetória?

DFD: Linear.

Professor: Como que a gente pode fala a cerca da trajetória da onda? Ela é o que? O DFG contesta o uso do termo aleatório, o que vocês acham? Tem algum termo da trajetória da onda, tem trajetória? Não tem? O que vocês acham?

DMM: Não sei a palavra certa... Ela vai seguir um esquema...

Professor: O que a gente pode falar da trajetória da partícula, ela e o que a trajetória da partícula? O DFD usou um termo linear, será que tem algum outro termo mais apropriado, o que vocês acham para essa discussão aí de trajetória?

Professor: Com certeza, deixa eu dar um auxílio pra vocês aqui. Com certeza, para o DFD fazer essas representações [...] ele [...] você posicionou ao acaso essas duas faixas de partícula? Você olhou DFD e disse: acho que vai ser aqui, e representou?

DFD: [...] um ângulo.

Professor: Teve um ângulo que você estabeleceu mais o menos na sua figura de que maneira?

DFD: Olhando na distância da fenda [...]

Professor: Na sua representação, na hora de fazer o desenho mesmo. Pode falar. O que é que você fez na hora de fazer o desenho?

DFD: [...] quando eu peguei, fiz o ângulo que ela fazia aqui, assim [...]

Professor: Com o que você fez, a partir do que? Você usou uma régua?

DFD: Não, eu usei o ângulo aqui da metralhadora.

Professor: Alguém usou uma régua para fazer essa representação?

DFD: O ângulo que estaria aqui (mostra no desenho) seria [...] estaria lá [...]

DFG: Não, eu tracei diferente, tracei uma linha imaginária aqui da angulação, aqui da barreira aqui, daqui até aqui (mostra a figura), com se fosse [...] a fenda projetada na parede do fundo.

DFD: [...] eu peguei aqui [...] ele estava alinhada no centro, daí o ângulo que ela fez aqui [...] eu peguei e fiz aqui com a [...]

Professor: Ok, quando vocês fizeram isso, ou com régua ou visualmente, vocês estabeleceram que a trajetória da partícula estava o que?

DFG: Em direção do ângulo

Professor: Tem outro termo para isso? Que não acontece na onda, ou acontece também na onda? Vocês [...] está faltando uma única palavrinha. É simples... estou quase dando essa palavrinha prá vocês (risos)

DFC: [...]

Professor: Fala DFC!

DFC: [...]

Professor: Ponto final. Pergunta: esta entidade aqui, o que vocês têm a dizer da trajetória dela?

DFC: A gente não sabe onde ela vai parar.

Professor: A gente não sabe onde ela vai parar?

DFC: [...]

Professor: No entanto, a trajetória dela está definida?

Aluno: [...]

Professor: Muito bem. Outra coisa, quando nós fizemos as representações aqui, quando vocês fizeram as representações aqui na parede, como é que foram essas representações aqui, do DFG, a representação do DFD tá aqui a da DJA, como é que foi o sistema analógico, o DFD. Analogicamente o que foi que vocês representaram, nesta parede aí? O que são essas coisas aí, são feitas do que, essas manchas que vocês fizeram aí?

DFG: Projéteis

Professor: Vocês encheram do que, cada pontinho aqui, está representando o que?

DFG: Uma bala, um projétil.

Professor: Um projétil, ok? Quando vocês foram fazer essa representação nas paredes aqui, olha, ela não aparece em nenhum dos desenhos de vocês. Ela não aparece em nenhum dos desenhos finais de vocês. Na primeira representação, claramente vocês fizeram uma representação. Nessa de hoje, curiosamente ninguém representou nada na parede, mais não acontece nada na parede? Como que a gente representaria na parede essas ondas que então chegando na parede? Vocês perceberam isso, que na própria parede vocês não representaram nada? Vocês não representaram porque achavam que não precisaria ou porque não sabiam como representar? Porque muitas vezes vocês falaram, achei que não precisasse representar, na parede. Como que foi que vocês lidaram com essa coisa aí?

DFD: Porque à bala [...] é fácil [...] ela vai bater lá, uma partícula vai ficar lá, então você tem uma trajetória definida. Agora, a onda não, ela bate e não fica marcado nada na parede.

DFG: O projétil tem massa, a onda... massa significativa, um projétil tem uma massa significativa, uma onda formada de partícula, porque [...] não vai acontecer nada na parede.

DFC: [...] no ponto que atingisse a parede, ela não iria causar nada na parede, só iria aquecer aquele ponto e não iria manchar a parede...

Professor: E uma onda de água, como e o caso aí? Vamos imaginar o seguinte: vamos imaginar que nós tivéssemos uma parede pintada de branco, e nessa água eu colocasse um corante, uma tinta. O que ia acontecer? Vamos supor que nós tivéssemos uma parede de gesso aí eu coloquei o líquido ali colorido com muita calma, tingi de tal maneira que a parede absorvesse um pouco da tinta, naturalmente essa tinta ia tingir a parede. Eu ainda não soltei bolinha nenhuma lá dentro, estou com água perfeitamente parada. O que ia acontecer, ia

manchar a parede? Ia manchar, principalmente se fosse uma parede de gesso, por exemplo. Vocês fizeram aquele experimento simples de cromatografia no giz? Pode tingir daquela forma, como cromatografia no giz. Mais a superfície da onda está parada, aí eu chego lá e solto a bolinha, como é que isso ia se refletir na nossa parede branca?

DFG: [...] ia atingir acima do nível da água parada.

Professor: Em que altura?

DFG: Pela intensidade da onda.

Professor: Ou pela?

Aluno: [...]

Professor: [...] que são propriedades que estão relacionadas? Sim, estão relacionadas. Muito bem, se a gente tivesse que fazer agora nessa parede, esta representação. Vocês não querem aproveitar e tentar fazer nessa parede de duas ondas esta representação, uma coisa rápida, para a gente discutir um pouco, então agora na parede do fundo com um novo sistema, vamos imaginar: existe uma tinta na água e essa parede é perfeitamente branca, de gesso ou de giz e ela vai tingir essa parede. Então, façam um perfil do tingimento da parede, da maneira que vocês acharem melhor, não se preocupem com o certo ou o errado, tá.

(tempo para representação)

Professor: Ok? DMM representou, DFG está representado (sem pressa), DFD está representando.

DFD: [...] de acordo com o gráfico.

Professor: Não precisa se preocupar com o gráfico.

DFD: [...] quanto maior a intensidade tanto mais alto [...]

professor: Ok.

(alunos representando)

Professor: Não precisa ser muito científico nesta representação, né.

Professor: Todo mundo muito bem... (Professor comenta com NMM)

Professor: Posso debater uma ou duas representações aqui. Eu quero dar uma olhadinha... Vamos pegar aqui duas ou três representações, isso basta. Vou pegar a do DFG e também vou pegar a do DFD. Os três aqui representaram, vamos dizer assim, um nível, (...) é alguma coisa mais ou menos por aí que vocês procuraram representar? Ok, pergunta: Será que se a gente for examinar com detalhe os desenhos, vocês vão ter representado esse nível da tinta na mesma altura? Rigorosamente? O que vocês acham?

DFD: [...]

Professor: Será que a altura do nível de tinta que a água subiu, é a mesma nos três casos?

Professor: Precisaria ser, prá começo de conversa?

DFD: depende da posição.

Professor: Depende do que, DFD?

DFD: Depende da posição de cada um.

Professor: Ok [...] que pode estar em que posição aqui, ao longo dessa parede? O que é que vocês acham? Um fez de um jeito e outro fez de outro. De qualquer forma essas representações estão na mesma altura? Precisam ser da mesma altura? Alguém discorda disso ou alguém não entendeu aqui a nossa observação?

DFG: [...]

Professor: E se agente eventualmente provocar um distúrbio diferenciado em cada sistema?

DFG: Ai vê a diferença.

Professor: A gente vê a diferença. Muito bem. DFD, DFG e DJA... Agora vamos voltar para essas representações aqui. O DFG está aqui... da DJA aqui e a do DFD aqui (Professor mostra as representações). Pergunta: As associações que vocês fizeram aqui nesse desenho agora, e entre cada representação aqui, cada objeto que partia daqui, é equivalente aos três desenhos? Entenderam a minha colocação? Cada figurinha que está representada aqui, vocês associaram com cada coisa, o que? Dito de outra forma, cada pontinho representa o que?

DFG: Um projétil.

Professor: Um projétil isso é verdade para os três desenhos? Nem que vocês não tenham conversado com os colegas, vocês acham que isso é verdadeiro... Ok? Então, qual é a correspondência que existe aqui? Cada ponto representa um projétil. Existe a possibilidade de alguém ter representado meio projétil aqui? Dificilmente vocês representaram meio projétil. Então, vamos procurar primeiro esta diferenciação, nesse sistema. Quando nós lidamos com esse sistema aqui (balis, vamos chamar assim) cada pontinho aqui, está representando o que, DFC [...] que você já falou?

DFC: [...]

Professor: Cada pontinho representa o que? Sistema de que? Você comentou quando começamos ao debater esse desenho.

Professor: Eu sei... Um sistema do que? O que diferencia esse sistema desse segundo sistema? Isso aqui é uma representação do que? E isso é uma representação de que?

DFC: Partícula.

Professor: Muito bem, concordo, isso aqui é uma representação de partícula. Quando a partícula chega aqui, ela chega de que tamanho? De um projétil? Dá para chegar como meio projétil? Um projétil e meio...? Ou zero de projétil? [...] Não... Diga!

DFC: ...

Professor: Ou seja, há uma diferença aí entre esses dois sistemas. A partícula, ela chega como uma partícula, o que? (nós já debatemos na atividade da aula passada, não sei se vocês estão lembrados). Ela chega como uma partícula íntegra, inteira, nós contamos uma por uma. No caso da onda isso é verdadeiro? Portanto, no caso da onda a gente tem que falar o que?(...) Que propriedade estamos falando toda hora, corretamente? Ficou claro isso? Então, esse sistema aqui, ele manifesta uma coisa que nós chamamos corpuscularidade, ele é granulado [...] e a partícula, a gente viu no texto e debateu aqui hoje, ela chega inteira, não chega meia partícula 0,75, não. A onda tem essa mesma manifestação? Não.

A segunda coisa que agente já observou aqui, como é que acontece mesmo? O que é que está definindo aqui, no caso da partícula?

DFG: Trajetória.

Professor: Trajetória. E no caso da onda?

Alunos: Respondem juntos (...)

Professor: No caso da onda não esta definida a trajetória. Tem mais uma propriedade importante que a gente pode comparar nesses dois sistemas. O DFG falou uma coisa importante agora pouco né, eu pergunte da intensidade na parede e coisa e tal, o DFG falou assim, que o projétil tem uma característica que a onda não tem. Que propriedade você falou?

DFG: Massa.

Professor: O DFG falou massa, onda tem massa? É meio difícil de saber se uma onda tem massa ou não, o que vocês acham disso?

DFG: [...]

Professor: Será que este (representação) volume de água aqui tem aqui, não tem massa? [...] 100 ml de água nesse cantinho aqui [...]

Alunos: respondem (não dá para entender)

Professor: De qualquer forma este conceito é difícil, mais vamos procurar construí-lo. No momento em que eu coloco a água aqui, vamos dizer 500 ml (1/2 l) de água. Essa massa está distribuída no sistema, provavelmente ela se esparrame, evidentemente, dentro do sistema, aí eu causo uma turbulência nesse sistema.

DFD: [...]

DFG: Se você provoca a onda, não altera a massa do sistema...

Professor: Tem alguma alteração de massa aqui...? Que tipo de alteração de massa tem aqui... nesse... arranjo aqui?... Se pesarmos o sistema todo, não tem alteração de massa... Fala DJA!

DJA: Está considerando a massa da parede à medida que vai [...]

Professor: E essa massa proveio da onde, essa massa que vai se acumular aqui? Portanto houve daqui para cá... Fala DFD! E aqui, o que vocês acham? Mas houve transferência de alguma coisa, ok?

DFG: Energia

Professor: Esse sistema transporta o que?

DFG: Energia.

Professor: Ok, e este transporta o que?

DFG: Massa.

Professor: Tem mais um dado interessante, nas representações. Todos vocês fizeram nesse segundo caso, uma representação muito interessante, porque tem esses pontos aqui, olha. Vamos pegar os demais desenhos..., DMM, você está acompanhando? Você está quieto demais!

DMM: Estou, estou meio quieto.

Professor: Estão percebendo essas representações? Vamos pegar a representação da DJA..., olha só... a da DJA..., a do DFD eu também quero dar uma olhada, particularmente existe um desenho do DFD... O que são todas essas representações aqui, particularmente, essa que o DFD colocou e que todos vocês falaram... uma representação bem interessante, onde se supõe que os máximos estão acontecendo aqui? Por que essas coisas estão acontecendo? Que propriedade está se manifestando aqui.

DFD: Fala mais não entendo.

Professor: Fala de novo, com toda sua voz DFD...

DFD: Interferência...

Professor: Ok, ficou claro isso? E aqui? Existia interferência? Então veja, será que deu prá vocês agora traçarem um quadro mais o menos geral do comportamento desses dois sistemas físicos? Ok, então agora nós vamos aproveitar e fazer uma tabela com todas essas informações que vocês encontraram. Então, aqui à esquerda nós temos todas as informações de partículas... e à direita temos as representações de onda. Então a primeira propriedade que a gente pode pensar em examinar é justamente com relação ao objeto que nós estamos querendo representar. A partícula, ela apresenta o que?

Uma coisa que nós chamamos, né..., o fato dela ser íntegra... sempre chegar como uma partícula perfeita e inteira... lá do outro lado da parede. Ela apresenta que propriedade... (eu cheguei a comentar com vocês?) ela se comporta como uma...?

DFC: Partícula

Professor: Partícula, é isso que o DFC falou? Mas ao invés de a gente falar particularidade que é uma palavra meio momentânea, é melhor a gente imaginar que ela se comporta como pequeno corpúsculo, e ela apresenta então, o que?

DFD: Massa.

Professor: Não é bem a massa, a onda também tem uma espécie de massa ali, mas ela apresenta corpuscularidade, ela é uma coisa granulada na qual eu só consigo contar unidades inteiras, ok? Então a gente representa (...) essa propriedade aqui..., só que eu não posso falar nessa propriedade, então eu tenho que apelar para que outra propriedade, que o DFG falou agora pouco bastante aí...?

DFG: Energia.

Professor: Qual outra coisinha que o DFD falou também...?

DFG: Intensidade.

Professor: Agora a gente pode pensar na questão do percurso de cada uma dessas entidades físicas. O que acontece no caso da partícula, com relação ao percurso dela?

Aluno: Trajetória definida.

Professor: Trajetória definida.

Professor: Na onda o que acontece?

DMM: Indefinida.

Professor: Em particular essa segunda linha nos interessa muito. Terceiro, o que cada uma delas transporta?

Professor: A partícula?

DFG: Massa.

Professor: E a onda?

DFG: Energia.

professor: Por fim, tem alguma coisa que esta entidade física manifesta, que esta entidade física não manifesta, que está claro nas representações de vocês... Então, isso aqui e um exemplo de interferência... Mais uma coisinha que tem aqui em baixo, daqui a pouco. Bom, então eu quero que vocês analisem esta tabela com calma, comparem bem essas duas coisas, e a pergunta é: ficou bem claro essas diferenças entre essas duas entidades físicas? Dentro de um experimento de duas sessões de um experimento pensado, a gente conseguiu tirar propriedades fundamentais do comportamento desses sistemas físicos. Alguém tem alguma critica a essas propriedades? Qualquer um de vocês pode chegar e falar: professor, eu não concordo que a partícula faça isso ou assado, ou que a onda seja assim ou assado... mas, dentro do arcabouço científico que vocês têm, examinem este tema e critiquem essa tabela, concordo não concordo e procurem refletir bastante esses dois temas e busquem, não precisa ser hoje e nem agora, mais vão buscando situações em que nós temos a manifestação de um ou de outro evento e procurem vincular cada uma dessas propriedades a um evento físico.

DFG: [...]

Professor: Também, também, pelo menos a energia cinética vai se transformar, em energia...

DFG: [...]

Professor: Também, também transfere, ficou claro isso? No caso da onda fica mais evidente que ela transfere massa ou mais evidente que ela transfere energia?

Aluno: Mais energia...

Professor: Mais energia, no caso da partícula fica mais evidente que ela transfere massa, embora a gente não possa dissociar completamente esses dois eventos.

DFG: No caso da água aqui, se ela bate na parede ela tem partícula de água.

Professor: Desde que o sistema não seja ideal, se tivermos uma partícula perfeitamente impermeável vai haver somente transferência do que? Com certeza.

DFG: Energia.

Professor: Com certeza só de energia e não transferência de massa.

DFG: Tsunami, transfere energia.

Professor: Transfere energia, hoje com certeza está tudo seco lá, com certeza transferiu energia para o sistema.

Professor: Bom, nos vamos assistir um trecho de um filme né NMM? Aquele filminho que assistimos na aula passada, nós vamos assistir uma seqüência maior dele, mais o que eu tenho a dizer para vocês é o seguinte: Vamos dar um intervalo para vocês, mais vou pedir para vocês voltarem hoje ainda.

Estou percebendo que o trabalho com vocês é muito satisfatório, uma experiência nova que estamos propondo aqui e vocês mantêm um nível de interesse e atenção bastante ampla, então vamos fazer o seguinte: vamos agora para um intervalo de recreio. Primeiro, vamos ver o trecho do filme, do tiozinho. Aí a gente faz um intervalo e vocês topam voltar para fazer uma leitura do texto né NMM e a gente vai avançando até o ponto...

Filme: (...)

Professor: Uma perguntinha: O inglês que esse senhorzinho fala é bem claro, mas ele fala rápido. Alguém consegue compreender? Se vocês quiserem eu posso traduzir para vocês. Eu não quero ficar falando (é som para todo lado aí...). Se vocês sentirem necessidade de tradução eu auxilio vocês... Ok? Então vamos lá...

Filminho...

Professor: Em primeiro lugar aqui já tem uma diferença com relação à representação de você, que é uma diferença nos esquemas.

Alunos falam juntos...

Professor: Nem preciso estar aqui, viu NMM... eles vão sozinho...

Professor: Ok? Naturalmente as representações aqui de intensidades, diferem um pouco das representações de vocês, mas é como eu falei: nós não estamos preocupados com [...]. O importante e que vocês consolidem a idéia de que quando nós temos um sistema de ondas partindo de uma fenda, que evento vai acontecer lá?

DFC: Interferência.

Professor: Ok, ponto final. A onda é um sistema que exibe transferência, no caso de partícula aparece esse padrão de interferência? Não, não aparece esse padrão de interferência, então estas duas propriedades são características de cada um desses objetos mecânicos nos quais estamos lidando aqui, então é em função dessas aracterísticas que agente classifica o sistema como corpuscular ou ondulatório... assim com trajetória definida e indefinida, transporte de massa e transporte de energia, naturalmente resguardadas alguns cuidados físicos aqui... Então essa atividade aqui nos fizemos para que? Para que vocês consolidassem justamente as propriedades físicas manifestas em cada uma dessas atividades. No fundo foi uma atividade proposta por vocês ate aqui, para consolidar essencialmente coisas que vocês já tinham o conhecimento... Tiveram física no ensino médio, um

bocadito, mas vieram fazer física aqui nos laboratórios e devem ter feito atividades que evidenciam o efeito da interferência, um laser com fenda e devem ter feito também estudos de objetos mecânicos que se deslocam em planos em eixos enfim, em trilhas e por aí vai...

A nossa intenção então aqui foi justamente consolidar conhecimento que vocês já tinham de dois tipos de sistemas, o sistema corpuscular e o sistema ondulatório... para que fique claro para vocês quais são as propriedades que temos com sistema corpuscular e quais propriedades com sistema ondulatório... Beleza pessoal? Tranqüilo? Então, nós vamos dar um intervalinho de uns 10 minutos pra vocês recarregarem as baterias...

Professor: Então pessoal nos vamos fazer novamente uma nova leitura do texto, para debater um pouco mais essas coisas no ponto vista de experimento ontem, e uma continuação do texto do Feynman, e vocês vão perceber que há uma continuidade na história...

Leitura do texto e interferência do professor...

Consideramos agora experimentos com ondas na água, o dispositivo é mostrado esquematicamente na fig.1.2. Temos um recipiente pouco profundo com água. Um pequeno gerador de água está vibrando para cima e para baixo por meio de motor que produz ondas circulares, provavelmente equivalente aquela nossa bolinha que soltamos e vai gerar onda na superfície da água, à direita da fonte e novamente uma parede com duas fendas, e além dela há uma segunda parede que atua como absorvedor de ondas, de maneira que não há reflexão ondas que nela chegam.

Professor: Veja como vocês foram espertos na hora de fazer a representação. Vocês tinham um problema sério sobre o assunto. Será que a onda reflete ou não reflete? Eu não falei nada disso, vocês anteciparam a idéia de que é mais fácil fazer uma representação caso não houvesse reflexão de ondas.

Leitura

Bem, na frente da parede a um detector de ondas que pode ser movido ao longo da direção x, como antes. Então aparece ali um detector, um absorvedor, aquele quadradinho aqui, hachurado... O detector é agora um dispositivo que mede intensidade do movimento ondulatório. Bom, imaginemos que o detector mede altura do movimento ondulatório mais sua escala é calibrada em proporção ao quadro da altura real. Esta informação é muito importante, porque vocês, dois de vocês contaram exatamente essas duas informação, uma delas foi o DFG e a outra, a DJA, o DFG falou principalmente que propriedade?

DFG: [...]

Professor: Não...

Professor: A DJA tinha dito intensidade, que outro termo você tinha usado?

DFG: Amplitude.

Professor: Então vejam que como Feynman fala aqui que a [...] é proporcional à intensidade de onda e mede a altura ondulatória a escala está calibrada em proporção ao quadrado da altura real é isto que Feynman está contando, a altura é que propriedade?

Aluno: [...]

Professor: Amplitude e o quadrado dessa amplitude, ele é diretamente [...] o que é proporcional ao quadrado da amplitude?

Aluno: [...]

Professor: A intensidade, ok. Então, desse modo a leitura é proporcional à intensidade da onda e por extensão proporcional a energia transportada pela onda. Então, a gente vai examinar agora a situação física que se apresenta. Com o aparato de ondas, a primeira coisa que se observa é que a intensidade pode ter qualquer valor, ok? Nós tínhamos percebido..., tínhamos chegado a essa conclusão aqui nessa nossa discussão?
Professor: Tínhamos chegado a essa conclusão.
Continua leitura
Se a amplitude de oscilação da fonte for muito pequena, então apenas um pequeno movimento ondulatório chega ao detector. Quando a amplitude da fonte aumenta, registra maior intensidade no detector, a intensidade da onda pode ter qualquer valor a [...] não algum valor inteiro, isto é não diríamos que alguma corpuscularidade na intensidade da onda. Agora medimos a intensidade da onda para vários valores de x cuidando para que a fonte de onda funcione sempre da mesma forma. A curva obtida tem um aspecto mostrado por $I_{1,2}$ na parte C, da figura. Então ali na representação mais a direita da figura nós temos a curva obtida.
DFC: [...]
Professor: Pois não...
Professor: Ou seja, à direita e a esquerda do centro o que acontece com a intensidade desses batimentos?
DFC: [...]
Professor: Ok. Todo mundo concorda? Então, a curva obtida tem um aspecto mostrado em $I_{1,2}$ na parte C da Figura.

DFG: Termo de interferência.

Professor: Termo de interferência... que é dado por essa componente aqui. Ok? Então, agora nós temos uma descrição clara do ponto de vista conceitual em que nós abordamos corpuscularidade, intensidade, trajetória definida e trajetória indefinida, transporte de massa, transporte de energia, interferência e não interferência e mais do que isso nós temos agora as relações matemáticas que caracterizam cada um dos eventos que a gente discutiu aqui. Então, esse conjunto de características de partícula é aquilo que nós temos evidência experimental para tratar o objeto como partícula e esse conjunto de características que nós acabamos de consolidar prá ondas é o nosso arcabouço experimental e teórico que nós temos para tratar dos sistemas ondulatórios. Então, com estas características nós reconhecemos sistemas corpusculares e com as características da direita, naturalmente nós reconhecemos os sistemas ondulatórios, ok? Então, alguma dúvida, algum comentário a mais? O que eu gostaria de pedir para vocês... agora é uma pergunta que eu faço para vocês. Ao longo dos cursos de física, conforme a gente já comentou aqui, vocês tiveram oportunidades de lidar com esses dois tipos de sistemas?
Aluno: Sim, mais separado.
Professor: Sim, mas separados. Em algum momento alguém chegou para vocês e convidou a fazer essa consolidação de conhecimento ai? O que vocês acharam de ter feito esse trabalho de consolidação de conhecimentos que no fundo vocês já tinham? Nós não trouxemos nada de novo aqui, rigorosamente. Suponho que se os cursos de física de vocês tenham dado esse aporte em nível de conhecimento. Pergunta: Se alguém quiser falar alguma coisa fale, o que vocês acharam de ter compilado esse conjunto de conhecimentos, que vocês já tinham de uma certa forma, mas se encontram um pouco mais distante.

DFG: A gente tinha noção, mais não tinha a capacidade de comparar a diferença de um entre o outro. Aqui a gente não fez experimento nenhum... mas só de experimento pensado dá para ver a diferença. O que a gente fez no laboratório a gente fez experimentos isolados. A... a gente colocava um alto-falante, uma freqüência e um tubo com areia [...] ela formava lá... a onda certinha, né. Então se aumentava a freqüência dava para localizar a onda certinha, né... Então, a gente não tinha noção do por que é onda e por que é partícula.

Aluno: Eu tinha um professor que deu essa noção... de partícula e onda.

Professor: Você tinha um professor que fez isso?

Aluno: Pelas aulas que ele deu pra comparar bastante, eu... comparei.

Professor: Aqui na Universidade, isso?

Aluno: Sim, aqui nessa universidade. Eu achei até que ele foi um bom professor... Ele falava sobre tudo... as comparações...

Professor: Ele fez apanhado geral de tudo...

Aluno: Não tão diretamente, mas ele sempre comentava, falava dos experimentos que [...] das propriedades... Por exemplo, aquela discussão sobre... que era partícula... que era onda... Por exemplo...

Professor: Entidades

Aluno: É [...] separadas, semelhantes... ou eram a mesma coisa... Essas discussões antigas, mesmo...

Professor: DFD e DJA querem falar alguma coisa?

DJA: Os dois assuntos eram tratados isolados e não tinham essa relação, até mesmo o experimento era feito de forma meio que mecânica, não tinha essa clareza.

Alunos:

DJA: É... uma coisa assim que experimento é experimento, não tem nada muito a ver com a teoria, não tem muito essa profundidade...

Aluno: [...] é, geralmente é assim: o experimento vem [...] e não a física, mas na física teórica.

DFD: Para mim na física experimental ela está dando experimento que e de cada (Professor... segmento da constante óptica...) experimento de onda... ela vai dar sobre onda, como o professor de física teórica. Ela não dá como o professor dá na lousa... eu acho que foi muito boa essa parte.

Professor: Muito bom. Se alguém quiser fazer mais algum comentário fica a vontade, Vocês são livres aqui para falar a vontade.

Professor: NMM, você precisa interromper ou não? Eu acho que a gente pode partir para uma próxima etapa, viu.

Professor: Vamos aguardar um minutinho a NMM e suas filmagens. Os méritos nós vamos ver nas telas do Cine System lá no Avenida Center. (Risos) Quiçá! Vamos ganhar o Leão de Ouro lá em Berlim, curso de ouro de Berlim.

DFG: Professor.

Professor: Diga

Interrompe a gravação[...]

Professor: Bem, vocês estão recebendo agora uma figura bastante parecida com a primeira figura que nos recebemos... tem uma fenda e um anteparo detector, também no fundo, uma coisa que é capaz de registrar os acontecimentos. Só que aqui do lado esquerdo não temos mais uma metralhadora, nós temos um canhão de

elétrons. Isto aqui é um anteparo eletrônico que vai emitir elétrons e ta ligado como se fosse uma lâmpada e aquela lâmpada estivesse emitindo elétron continuamente para esse arranjo aqui.

Aluno pergunta:...

Professor: Não, este sistema está emitindo elétrons... é a informação que eu estou te dando... está emitindo elétrons como se fosse uma metralhadora de elétrons e o que nós pedimos para vocês agora, adivinhem! O óbvio, nós pedimos para que vocês representem aqui a distribuição desses elétrons.

Aluno: Eu devo considerar o elétron como partícula ou como onda?

Professor: A escolha é sua, eu não posso opinar...

DFG: [...] Aí pega [...]

Professor: Tava indo tão bem né...

DFG: [...]

Professor: Não. Esse é um autêntico experimento pensado, nós vamos discutir esses experimentos que vocês estão fazendo aí.

Os alunos representam...

Professor: Representem como vocês imaginam.

DFG: [...] tem a mesma mobilidade [...]

Professor: Ele tem a mesma mobilidade de uma metralhadora. Esse canhão de elétrons tem a mesma mobilidade que a metralhadora. Eu antecipo também para vocês que emite um elétron por vez, como a metralhadora também faz...

DFG: [...]

Professor: Vocês fiquem livres para representar à vontade.

DFD: Se fosse o nível direcionado.

Professor: São elétrons.

Professor: Vocês são livres para representar o que vocês quiserem.

DFG: A parede barra no elétron incondicionalmente, funciona como onda ou partícula?

Professor: Ela absorve um elétron e ela registra isso, você pode ver que ela representa isso daí, qual a sua Dúvida? Quero ver se eu consigo te ajudar...

DFG: [...]

Professor: A parede que tem uma fenda?

DFG: Isso...

Professor: Ela não deixa os elétrons... não há efeito de tunelamento vamos dizer assim.

Professor: No momento que vocês tiverem elaborando os textos para descrever as representações que vocês fizeram, não esqueçam de identificar: *elétron uma fenda* no texto, ok? O titulo do texto é "Elétron uma fenda" para depois a gente saber avaliar esse texto do outro. Ta certo que vocês estão fazendo na mesma página né? Mas é bom escrever.

Professor: Bem, encerrada essa representação da primeira fenda, a gente pede agora para que vocês façam às repreresentações dos eventos que vão acontecer também considerando o canhão de elétrons, só que agora novamente o sistema tem duas fendas, então, a solicitação é que agora novamente vocês representem a mesma entidade física... no entanto agora, o arranjo tem duas fendas, portanto a representação física, portanto a

representação analógica do experimento. Naturalmente vocês já receberam o papel de gráficos onde a gente pede a transposição matemática do arranjo e após isso o texto ai justificando por que vocês fizeram essas representações.

Aluno: O que que dá quando junta os dois gráficos aqui.

Professor: Faça você um exercício mental sobre isso. Uma boa idéia. Se você tentou fazer isso e não conseguir, deixa claro isto no texto ok? O texto serve para isso. Se você não conseguir representar você explica também.

DMM: Aqui nós consideramos a resistência de ar, por exemplo, alguma coisa do tipo?

Professor: Não.

DMM: Pode desprezar?

Professor: Pode desprezar. A resistência do ar, o sistema está sobre vácuo nesse caso. Pode desprezar a carga elétrica, o sistema está sobre vácuo.

DFD: [...] uma metralhadora, então não vai poder acontecer uma interferência? Aí seria uma de cada vez, né?

Professor: Ela emite... vamos admitir que a metralhadora emite um elétron por vez. O máximo de informação que eu posso te dar nesse momento viu DMM. Você está argumentado exatamente o que, nesse caso?

Aluno: completando com uma onda, por exemplo, um elétron aqui... não teria como competir com outro elétron.

Professor: Entendi sua colocação.

Aluno: Porque seria um de cada vez na onda

Professor: Entendi a sua colocação, é importante que você elabore essa idéia no texto que você vai representar. Essas suas dúvidas inclusive, coloque no texto.

DFG: No caso do elétron, como nos projéteis considera que ele bate na borda e muda sua trajetória, ricocheteia ou não?

Professor: A representação e a escolha é sua. Esse professor está de sacanagem, não fala nada!

DFG: Você tem que ter as condições... Tem que ter ou não? Você falava [...] e se [...]

Professor: No entanto o que tínhamos no primeiro texto? Que entidade física e aqui nós temos o que? Eu não vou dar a resposta.

Aluno: Estou considerando como partícula.

Professor: Eu não disse para você não fazer isso.

Professor: Escrevam, manifestem todas as angústias as dúvidas e as condições que estão imaginando para o sistema, né NMM? Se for isso é assim, se for aquilo é assado... não tem nenhum impedimento aqui para vocês.

DFG: [...]

DFG: Pode colocar as dúvidas.

Professor: Pode, pode dizer assim: eu tenho dúvida...

DFG: Pode ser um [...] que desvia o elétron [...]

Professor: Bem, vocês terminaram? Vamos dar uma examinada nessas representações, de uma fenda, de duas 2 fendas... Representação do DFG uma fenda, representação do DMM, uma fenda... matemáticas e representações físicas da cada um de vocês. Deixa eu dar uma olhadinha na representação física do DMM, de uma fenda. A representação física do DFD está aqui, olha e a representação física da DJA de uma fenda tanto no sistema físico analógico e a representação matemática dela. O DFC ele pode levantar ali para a gente dar examinada nesses dois casos. Quem quer falar da sua representação?

DFG: Eu considerei como partícula e o mesmo caso do projétil em si, considerando como partícula.

Professor: No caso de um sistema por uma fenda?

Aluno: Isso...

DFC: Eu considerei tanto como partícula quanto onda, partícula como projétil, onda igual da água.

Professor: No caso do sistema de uma fenda.

DFC: Isso.

Professor: Como é que... você manifestou isso no seu desenho?

DFC: Eu considerei os dois né, primeiro isolei só com partícula e depois só com onda.

Professor: Vocês estão conseguindo ver a representação do DFC, aqui? Esta bem clarinha, mas posso [...] Você me autoriza DFC? (Professor mostra o desenho). E na sua representação matemática em que aspecto ficou o sistema, o gráfico?

DFC: Na verdade ficou uma gaussiana com intensidade no mesmo ponto ok.

Professor: Alguém mais quer fazer comentário? A DJA tem uma representação que eu queria confrontar aqui om a representação do DFG. Todos estão vendo aqui representação do DFG e DFD também, né? DFD! Levanta um pouco a sua representação. Dêem uma olhada na representação da DJA. DJA conta para nós o que você fez nessa representação.

DJA: Bom, eu tentei representar o comportamento como onda e como partícula. No caso de uma fenda, considerando como partícula tem aqui a maior quantidade como aconteceu nos projéteis e também como uma onda onde a intensidade vai diminuindo, afastando da fenda e a intensidade é maior na direção da fenda e a intensidade [...] comportamento como onda e como partícula coincide no caso, nesse caso na mesma direção da fenda.

DFG: Eu penso assim: o elétron é uma partícula, ele não vai se tornar uma onda... Então ele desenhou ali (várias ondas), o elétron não vai [...] se ele foi lançado para uma direção, ele vai seguir aquela direção. Talvez alguns têm um comportamento que parece onda, mas não que vai se tornar uma onda. No caso do elétron, o elétron é ma partícula, em alguns aspectos pode se comportar como ondas [...] na vai entrar aqui e começar a fazer.

DFC: Eu já concordo com a DJA, meu gráfico de probabilidades, eu fiz errado, ainda mais quando ela falou eu mudei de opinião... Na verdade aqui não tem nada de intensidade... agora que eu... (aluno confuso)... O elétron pra mim é uma partícula, com caráter ondulatório não que seja uma onda, ou seja, ele não vai ter esse caráter ondulatório igual para toda a parede como se fosse uma onda. Não vai ser uma partícula vai ter uma abrangência maior, porque para mim uma partícula tem um caráter ondulatório. Seria como o da DJA ela fez por intensidade também na. Um ponto de maior intensidade, não teria uma partícula normal, um projétil normal, uma massa... ele tem aquela [...] linear [...] o que foi que ele disse?

Professor: Trajetória

DFC: Aquela trajetória não linear que ele disse, ele falou outra coisa.

Professor: Definida.

DFC: Isso... Definida.

DFG; Se um elétron foi direcionado por um método ou outro, ele vai seguir aquela direção, ele não vai, sei lá como um acelerador de partícula, ele é direcionado, ele não vai abrir, como a onda, por exemplo, a tendência dela é ir abrindo, o elétron não, ele sai em diversas direções, mais se você orientar ele em uma direção ele vai seguir aquela direção.

DJA: Mais assim em termo de intensidade, não acha que poderia ter essa dispersão..., assim [...]

Aluno: É o que eu queria dizer...

DJA: Assim... eu até concordo. Na direção que ele vai seguir vai ter uma intensidade maior, mas nessa região...

DFG: Sim ele vai ter uma região que no caso aqui é o espaço da fenda..., não mais que isso...

DJA: [...] então no caso de fenda única seria como partícula...

DFG: Isso...

DJA: E como onda seria...

DFG: Eu consideraria exclusivamente como partícula que chega onde um projétil normal chegaria...

DFC: Um projétil normal...

Aluno: [...] mas hora que vem outro elétron ali... se for na prática mesmo ele vai [...] com certeza aqueles que vêm com mais energia, ele vem e vai bater ali... a maioria vai ficar ali, só que tem aqueles que tem a repulsão.

Rever

DFG: Eu acho que pode ser considerado como onda... que nem um fóton, por exemplo, ele transfere energia, ele não transfere massa... então é uma característica de onda. Um elétron, já eu acredito que seja massa, não energia...

DFC: [...]

Professor: Bem, mais alguma observação? Então vamos ver agora se este sistema com duas fendas, em função do que vocês comentaram, como é que foram as representações de vocês para o sistema com duas fendas. Vou dar uma olhada no trabalho do DFG, a representação que o DFG fez... com gráfico inclusive. Deixe-me dar uma olhada na representação do DMM...

DFC: Se essas fendas fossem [...] tem um caráter ondulatório... se essas fendas fossem assim próximas e fossem elétrons, onde a onda de um, pudesse interferir no outro aí você poderia encontrar elétrons em outros lugares e não somente nesses dois pontos...

Professor: Ok?

Professor: DFD!

[...] Representação do DFD vamos ver se tem uma representação analógica e uma matemática, vamos dar uma olhada na representação da DJA e aí vamos dar uma olhada na representação do DFC.

Professor: Então, na essência nós podemos distinguir as representações de vocês, digamos assim, três grupos de 5 pessoas aqui. Um grupo tem um elemento que é o DFC. O DFC fez essa representação aqui que não vi nenhuma similaridade com outras representações de vocês aí. Como vocês falaram aqui, nós temos dois grupos, um dos grupos fez essa representação que se evidenciam duas posições de probabilidade de elétron e coisa e tal, que é o DMM e o DFD, enquanto o DFG a DJA mostram um sistema aqui, com três tipos. Então, o que vocês acham ai em que tese justificar esses resultados aqui, um tipo, dois tipos... O DMM disse que poderia ter mais dois tipos...

DFG: Eu considerei por causa da distancia, eu considerei uma distância pequena assim o elétron é considerado partícula-onda, eu considerei isoladamente o elétron como partícula e isoladamente como onda. Não interpretei ele com comportamento dos dois ao mesmo tempo e com a luz, posso considerar como partícula ou como onda, nunca dizer que ela é só isso ou só aquilo, considerei separadamente.

DJA: Eu de novo tentei mostrar os dois comportamentos, no caso aqui na direção das duas fendas. Ele tem um comportamento como partícula, onde a intensidade é maior nessa região e aqui no eixo de onde X é igual a 0 tendo a interferência das ondas. Não consegui representar, mas tendo também aqui uma diferente intensidade

entre essas regiões aqui, e essa região aqui onde a interferência de ondas seria maior do que tendo comportamento como partícula, porque no caso aqui esta tendo uma interferência, no caso de duas fendas, aqui seja uma intensidade maior que nessas duas aqui na direção das fendas.

DFG: Eu fiz o gráfico com dois picos considerando que os elétrons não se desviam, depois um pico com um dos projéteis se eles desviam na ondulação, eles vão se encontrar no centro. Eu considerei exclusivamente o elétron como partícula não como onda em hipótese nenhuma.

DFC: Eu também considerei como partícula e fiz com dois picos. Eu tentei fazer com a junção do gráfico... mas...

DFD: Posso fazer uma pergunta?

Professor: Claro

DFD: É o seguinte: eu acho complicado fazer um pico no meio. Como eu já disse o elétron... seria um elétron de cada vez, então eu chão o seguinte não seria duas ondas certinhas... Na minha opinião se houvesse interferência um estaria mais na frente do outro...

DFG: Concordo! Meu pico esta no centro porque é partícula.

DFG: [...] se fosse só uma ia ser aqui na direção da fenda, mas precisava ter duas ondas para interferir e ter um pico maior aqui no centro.

DFC: Sua consideração como uma onda...

DFG: Isso...

Professor: Mais alguma discussão? Então hoje nós vamos encerrar as nossas atividades por aqui. Nós vamos deixar vocês curiosos e nós vamos pedir o seguinte: que vocês entregue a matéria para nós, podem ficar com o texto. Nós pedimos para que vocês não se envolvam com esta atividade fora daqui, até segunda feira... Por que nós pedimos isso? Nós estamos procurando ver o quanto a atividade facilita vocês lidarem como os conceitos que nós estamos trabalhando aqui. Então se vocês saem daqui e vão se informar um pouco, a gente já não pega mais apenas a realidade do nosso trabalho, mas a realidade acrescida daquelas informações que vocês foram capturar fora daqui... Então é importante que vocês se mantenham um pouco ausentes... é lógico que vocês podem ficar refletindo sobre o assunto, claro! É impossível não fazer isso... e é saudável inclusive fazer isso... mas nós pedimos que vocês se resguardem um pouco e evitem evidentemente conversar com as pessoas que já participaram da atividade. Por que isso daí? Pelo seguinte também... no primeiro texto que nós lemos, na atividade passada o Feynman falava alguma coisa, mais ou menos no seguinte sentido: que na realidade a gente [...] mistério da mecânica quântica... certo? E nós vamos na próxima semana, justamente se envolver com esse mistério. O Feynman fala no texto que os físicos não conseguem compreender esse mistério que está por trás desse elétron. Tampouco nós vamos conseguir compreender. Então, a próxima atividade nossa aqui, não é uma atividade para trazer respostas para vocês. Pelo contrário, é uma atividade que visa justamente colocar vocês dentro da questão da mecânica quântica, desses conceitos mecânicos quânticos que são complicados de se tornarem evidentes, quer dizer o que a natureza tem de mistério... até esse momento não teve mistério nenhum, mas é na próxima atividade que a gente vai, não elucidar esse mistério, mas compreender o qual é esse mistério. Ok? Então é essencialmente isso. Nós numa avaliação rápida que a NMM e eu fizemos aqui, a gente está realmente muito satisfeitos em trabalhar com vocês. Porque nós não estamos aqui avaliando o certo ou o errado. Nós estamos inclusive procurando perceber qual é o grau de envolvimento que vocês têm com o trabalho, com o conteúdo, seja lá o que for, no momento em que nós saímos de uma aula padrão e passamos para vocês uma

atividade diferenciada daquela que vocês estão acostumados numa aula padrão. No fundo é isso e a gente está percebendo que esse retorno está sendo extremamente satisfatório. Por que? Vocês podem ter aí conceitos bem consolidados ou mal consolidados. Não é isso que está em jogo. Mas o fato é que vocês se envolvem bastante com as atividades e isso é satisfatório para nós. Então a gente está começando a perceber que a atividade é bastante positiva e saudável porque há um envolvimento bastante amplo na discussão. E em conjunto, nós e vocês vamos construindo aquelas concepções que são bastante importantes para a compreensão de determinados fenômenos, como a gente fez aqui com partículas e com ondas. Ok?

NMM: Da minha parte eu estou convencida né. O professor me convenceu, porque eu não tinha pressa para fazer isso, mas o professor me convenceu que não é comum turma como essa. Realmente, a turma é muito boa. Então imaginem agora no final do ano não é um período legal, não é? Está todo mundo cansado. Vocês não precisam nem perguntar isso. Estamos praticamente em novembro, em ritmo de final de curso, de acúmulos e tudo mais. Então realmente esse convencimento valeu à pena. Por que quando o professor faz esses questionamentos com vocês é importante quando há dúvida... eu penso que é assim... eu fiz, mas não tenho certeza. Essa dinâmica... esse retorno que vocês dão... porque vocês poderiam não possibilitar o diálogo e quando o professor faz essas perguntas, as respostas poderiam ser bem diretas, muito curtas o que tornaria muito difícil avaliar a atividade. Isso é comum acontecer e o que a gente faz nessas circunstâncias? A gente agradece de igual forma e escolhe outro grupo. Mas não é o caso.

Professor: Não é o caso aqui, eles gostam de debater.

NMM: Inicialmente eu pensei que 05 alunos seriam insuficientes para uma discussão dessa natureza, no entanto tivemos um profundo feedback naquilo que foi proposto aqui. Então eu quero agradecer.

Professor: Eu sempre insisti realmente com a NMM que valia a pena realmente trabalhar com vocês. São só considerações finais, mas vocês são uma turma que tem interesse, então vale a pena aproveitar e o valor dessa colaboração de vocês para o trabalho da NMM não tem preço. A verdade é essa. Vai sair um trabalho de doutorado. Sem vocês não sairia, então é uma coisa realmente valiosíssima e é importante que no dia a dia acadêmico escolar essa coisa seja realmente participativa e não tanto aquela relação professor aluno de professor, onde o professor é transmissor de informação, mas o professor que convida vocês ao debate, porque vocês têm a acrescentar no trabalho. É isso que é fundamental, uma mudança no sentido de melhorar o processo ensino aprendizagem. A participação de vocês tem que existir porque vocês têm contribuições a dar e essas discussões que vocês estão fazendo aqui, permitem de uma maneira integrada com a gente aqui, que vocês acabem por construir conhecimentos de uma maneira mais bem acabada.

DFG: Eu acho que o aluno tem interesse. Eu acho que se todos os professores se envolvessem, seria de bom proveito para todo mundo. Poucos fazem isso...

Aluno: O professor fala em didática, mas na verdade ele... não muda... aí é complicado né...

Professor: A gente sabe que é assim. Não é uma vez, nem duas que eu comentei na sala de aula, na turma de vocês ou nas duas que é o professor que tem que mudar, se é que ele quer uma mudança.

Aluno: [...] um bom professor [...]

Professor: Claro, vocês esperam um bom professor para virem a ser bons professores. Até porque além do conteúdo programático que a gente debate com vocês... alguns apenas transmitem outros discutem, tem a questão

do espelho, do exemplo... Quer dizer: nós somos exemplos daquilo que nós queremos que vocês façam ou não? Ou fica no faça o que eu digo, mas não faça o que eu faço...

NMM: Eu acho que a última consideração é quando vocês colocam a dúvida, né? Tem que ficar muito claro o que você quer né? É isso mesmo, porque se as condições não forem dadas, eu não sei que caminho eu tomo. Então isso é importante para a gente refletir, depois cada... palavras de vocês é importante, então que vocês não tenham receio nenhum em colocar dúvidas, críticas como o professor já falou. Tudo o que vocês pensarem. O professor já falou muito bem que é uma atividade... seria um experimento de pensamento como alguém falou aí. Eu não fiz o experimento, mas eu refleti de tal forma. Então estamos a todo instante querendo perceber como vocês pensam com relação à atividade. Então para isso eu já me dei por satisfeita.

Professor: Em particular, nessa última representação que nós pedimos de vocês eu fui mais [...] eu contei quase nada para vocês...

DFG: O mais difícil não contou quase nada

Professor: Foi deliberada minha atitude

NMM: Porque gerar insatisfação não é problema, pode ser saudável... não pode deixar só na insatisfação. Se a gente encerrasse aqui e ficasse por isso mesmo, não seria saudável, mas a insatisfação do próprio professor, do aluno em relação àquilo que ele está vendo, ouvindo é saudável. Tem que ser resolvido é claro.

DFG: [...]

Alunos (risos)

Professor: Nós sabemos disso... É sinal que vocês se interessaram pelo tema e esse é o primeiro passo para o processo de aprendizagem. Se você não vê isso daqui um problema interessante a ser abordado, a ser refletido, a ser pensado, a ser resolvido, vocês não vão se envolver com ele. Então se vocês estavam com intenção de fazer isso já teve um ganho importante que é transformar uma situação de experimento de física, ainda por cima pensado... que não é em nenhum laboratório, que geralmente no laboratório isso é mais interessante numa coisa que fala: E agora, qual é a saída daqui, eu preciso investigar... Está dado o passo para o conhecimento de vocês, mesmo que a gente. Essa coisa que você está falando DFG é um retorno bastante positivo. Você está falando DFG é o seguinte: o que vocês fizeram aqui me aguçou a curiosidade e agora eu estou disposto a investigar. Pronto! Está plantada a semente de você querer aprender e se não for assim em outras disciplinas, não vai acontecer isso.

DFG: [...] o professor tem que incentivar o aluno para que ele responda, para que ele busque a resposta... acho que todo mundo aqui tem a mesma opinião...

Aluno: [...] é o dever do professor dar a matéria com uma prática interessante, mas poucos fazem...

Professor: Deixe-me retomar um pouco essa sua idéia. Ela é interessante porque o homem entendeu que é um ramo do saber que o homem entendeu importante investigar. Nesse sentido ela é interessante e eu compreendi muito bem o que você quis dizer. O que você quis dizer foi o seguinte: o professor tem que mostrar que a disciplina é interessante, que a quântica, a inorgânica, a físico-química são disciplinas que valem a pena ser aprendidas.

Alunos: [...]

Professor: Uma coisa que nós vamos também procurar deixar claro, na segunda–feira é o que nós queremos afinal de contas investigar, construir. Por quê? Porque afinal de contas não dá pra chegar prá vocês, pedir prá vocês. Vocês vêm, colaboram, ficam até cinco e meia, resolvem e tal. Até logo, obrigado, vocês vão pensar: o

que o professor e a NMM estão querendo. Nós temos que dar esse retorno para vocês. Nós vamos conversar sobre isso na segunda feira e depois em outras oportunidades quando vocês quiserem.

Então mais uma vez a gente agradece muito a presença de vocês. Bom final de semana. Estamos então com encontro marcado para segunda-feira a partir das duas da tarde. Está bem para vocês?

Começar a atividade 21...

ATIVIDADE – SISTEMA COM ELÉTRONS
Data: 19/09/06 Turma I

Professor: Pessoal, boa noite então a todos!

Alunos: Boa noite

Professor: Vamos retomar as nossas atividades. Hoje a gente pretende, avançar agora num aspecto que naturalmente nós não avançamos ainda, tem novidades hoje, nas atividades de hoje, e pode ser até que essa atividade se estenda um pouquinho além do previsto, naturalmente dependendo também de vocês, ok. Mas na essência, nesse momento a gente vai fazer uma atividade, um trabalho que vocês já vinham fazendo. No entanto, o sistema também é diferente agora.
(entregando as atividades)

Professor: Todos vocês receberam aí mais um daqueles esquemas com um aparelho contendo uma fenda, e lá no fundo um anteparo, portanto agora aqui, nós temos, não mais um gerador de ondas... metralhadora, mas nós temos um sistema eletrônico emissor de elétrons. Então nós temos um arranjo aqui, em que vai acontecer emissão de elétrons e o que nós queremos é que vocês representem agora, evidentemente o que vai acontecer nessa superfície e como treino agora, um detector de elétrons.

DFJ: Professor, o emissor está em linha reta ele se movimenta [...] fenda?
Professor: Sim, ele se movimenta também da mesma forma que a metralhadora se movimentava, ok!
Aluno: E essa fenda, é larga... estreita...
Professor: Ela tem uma certa espessura também.
Alunos: [...] (risos). E a abertura?
Professor: A abertura é suficientemente grande para que passe um elétron.
Alunos: Exatamente um elétron ou [...]
Professor: Não, ela é um pouco mais larga que um elétron, em particular. Não sei se essa era sua duvida!
PR: Não, eu quero saber se ela é uma fenda do tamanho de uma porta, do tamanho de...
Professor: Não... não, ela é uma fenda extremamente estreita, ela é um pouco maior que um elétron. [...] DFP... e para todos..., ela é da mesma ordem de grandeza de um elétron se vocês preferirem, dimensões muito pequenas...
Os alunos elaboram as representações
DFP: [...] fala que é um emissor de elétrons. Emissor lançador?
Professor: Uhum
DFN: Pode ser considerado como se fosse uma metralhadora, esse emissor?
Professor: Metralhadora do que?
DFP: Elétrons
Professor: Elétrons. Vai esparramando um monte de elétrons o tempo todo. Vocês têm disponível, através desse canhão de elétrons, o tanto de elétrons que vocês precisarem.
Aluna: E as informações sobre o trabalho...
Aluna: [...]
Professor: [...]
Professor: Pessoal, na hora que vocês terminarem o texto, façam no papel de gráfico a mesma representação de probabilidade e de distribuição né, de elétrons no anteparo, como vocês vinham fazendo nos experimentos anteriores. Não esqueçam, por favor, do nome, tanto no papel de gráfico quanto no de esquema, e identifiquem no gráfico, como uma fenda ou duas fendas.
Professor: OK, bom! Nesta segunda etapa, não é muito difícil prever o que vem por aí né!
Turmaaa surpresa, uma figurinha com duas fendas, OK? O que nos queremos, é que vocês novamente, representem a distribuição de elétrons [...] anteparo final [...] duas fendas, o mesmo canhão de elétron, e naturalmente aqui no canto superior direito tem a representação da figura [...]. Novamente o canhão de elétron, atira elétrons continuamente, Ok? Um dado importante ou não, mas como vocês... se quiserem saber, como alguém perguntou: Como uma metralhadora, um tiro por vez, e tem tiros à vontade, tem elétrons à vontade.
'Os alunos fazem a atividade, com as duas fendas
Aluna: Professor, o elétron não é capaz de penetrar a parede?
Professor: Como?
Aluna: o elétron não é capaz de penetrar a parede?
Professor: Olha não nessas condições experimentais. Bom, naturalmente o exercício agora é o mesmo. Representar neste papel milimetrado, a distribuição de probabilidade, probabilidade né, de incidência de elétrons naquela superfície. Agora [...] é de vocês! Ok?

Professor: Pessoal, os desenhos estão maravilhosos... então agora a gente quer ouvir vocês, se tiver alguém interessado em se manifestar acerca de suas representações, como a gente fez nas outras atividades, Ok? Quem que inaugura o discurso? Todo mundo não espera, para ver o que o primeirão vai falar.
DFP: Ah, eu acho bom o tiozinho falar primeiro.
Professor: Quem?
DFP: Tiozinho!
Professor: Bom o tiozinho vai falar, mas daqui a pouco, ele não esta com o uniforme aqui...
Aluna: [...] O DFT tá esperando alguém falar.
Professor: O DFT tá querendo falar...
Aluno: [...].
Professor: Eu vou convidar um para falar.
DFF: Deixa que eu falo professor.
Professor: Ah DFF, fala um pouco para nós DFF.
DFF: Eu pensei assim oh, que alguns passaram reto, e um [...] parte do anteparo não passaria para lá... (Professor: gostaria de mostrar sua figura para o resto da turma? Não? então depois você me fala!) alguns atingiriam aqui e eles chegariam ao ponto zero, mas o máximo seria [...] e o segundo...
Professor: Mostra a figura pro DFN, DFF
DFF: Aqui seria a maior carga [...] gráficos
Aluno: Professor!
Professor: Fala!
Aluna complementa dizendo que fez o desenho semelhante a luz, você tem a luz, tem uma caixinha e ela passa por um pedacinho [...].
DFT: Eu pensei que o elétron tivesse o comportamento que tem uma onda, mas para entrar nessa fenda... o mínimo e o máximo...<mostra o desenho> não vai dar pra entender muita coisa (risos). Olha aqui como se fosse uma onda se ela chegasse no anteparo [...] o contrário o máximo seria aqui e o mínimo aqui, e aqui pra mim seria a mesma coisa, só que no meio seria o máximo <legal>.
DFN: Eu fiz igual ao do Paraíba,<risos> mas considerei que o elétron é como se fosse uma partícula e não como uma onda, e considerando todos os desvios da fenda aqui, porque se você tem um desvio aqui, aqui vai dar ½ e aqui vai dar 1½, portanto no meio vai ter maior intensidade, e você tem esses outros desvios que ficam mais no canto, portanto você tem uma probabilidade ao lado desses desvios. (risos)
Professor: Quem mais gostaria de se apresentar publicamente?
Aluna: Eu...
Professor: Espera só um pouquinho... DFM, DLL...
DLL: Então [...] fendas... que os elétrons se projetam no meio, eu considerei como partícula também... de uma fenda só que os elétrons atingiriam várias partes no anteparo...
Professor: DRB gostaria de se manifestar? DLL? DFA? DFB? DFJ?
DFJ: Então professor, eu fiz assim eu considerei o elétron como partícula e elétron-onda, que eu acho que ele é isso. Daí aonde fica a fenda na frente da parede, vai ter mais intensidade que é onde [...] e se fixa na parede, mas aí vai ter outras partes na parede que vai ter intensidade de elétrons que vão se comportar como onda que é o caso que a gente viu a aula passada, e daí vai ter aqueles pontos de máxima e de mínimo, onde esses elétrons se comportando como onda vão se anular e depois vão se somar as intensidades, aí eu fiz assim. Daí meu gráfico ficou, na frente das fendas com mais intensidade de elétrons, logo após vem o meio e depois vem entre a frente da fenda e o meio. Daí tem 5 máximos [...] Poucos... (Risos)
Professor: Quem mais quer falar?
DFE: No primeiro, uma fenda só, eu deixei o elétron meio como partícula igual em... No segundo, que tem duas fendas, como possui interferência das fendas, aí [...] tem interferência entre os elétrons, (Risos) os elétrons ficam na fenda ... aí no meio continua sendo maior, que é o lugar de maior intensidade, [...] e aí vai diminuindo.
Professor: Alguém quer falar mais alguma coisa? (alguns falam junto não tem como escrever o que eles falam...), algumas dúvidas são tiradas.
Professor: Pessoal nós vamos recolher os trabalhos de vocês, e é para colocar no gráfico a identificação das fendas, o nome de vocês no gráfico né, e a gente vai recolher. Tudo absolutamente identificado, por favor, claramente tudo, nós temos como localizar todas as partículas aqui, amanhã cedo a senhora da limpeza vai estar aqui, daí ela varre os elétrons que caírem no chão (Risos). Vamos discutir isso daí.
Bom, nós nas atividades anteriores, trabalhamos com sistemas diferentes. Na primeira atividade, nós tínhamos parede com uma fenda, duas fendas, só que nós estávamos lidando com entidades diferentes, que eram os projéteis da metralhadora. Na atividade anterior, nós estávamos evidentemente com o mesmo arranjo experimental, uma fenda e duas fendas, no entanto, as entidades ou a entidade com a qual nós trabalhamos foi uma entidade onda, ok? Antes de a gente analisar, o resultado de hoje ou alguma coisa além do resultado de hoje, vamos só dar uma repassada no filminho, até onde nós tínhamos visto, até a segunda atividade. Vamos tentar ver o que a gente aprende com relação àquelas duas entidades que nós tínhamos já examinado, então acho que é esse

sujeito aqui passando o filme. Ok? Tínhamos visto esse filminho até aí. O que nós vamos procurar fazer agora é tentar compilar os resultados dessas duas primeiras atividades. Na primeira atividade nós lidamos essencialmente com que tipo de atividade? Na segunda atividade evidentemente nós lidamos [...] o que é que vocês podem nos contar coisas ou propriedades que são características de cada uma dessas entidades que nós lidamos aqui? Examinando naturalmente os desenhos de vocês e o filminho, nesses dois experimentos.
DFP: As partículas eram indestrutíveis e as ondas não.
Professor: Quem mais? Elas são [...] que palavra você usou no comecinho?
DFP: Indestrutíveis
Professor: Todo mundo entendeu, ok? Indestrutíveis?
Aluno: Essa partícula sofre interferência destrutiva, só construtiva que não.
Aluna: As duas partículas não se juntame formam uma só e a onda se junta e forma uma só.
Aluno: Mas a probabilidade de formar...
Aluno: [...]
Aluna: Não tá falando de intensidade, tá falando assim: duas ondas, elas vem ou elas vão e elas acabam ou elas se somam e formam uma maior, a partícula ela não se destrói nem gruda uma na outra e forma uma maior, é isso.
Professor: Mais observações? <risos>
Professor: Então como é que essa história que vocês acabaram de debater aqui pode ser colocada na lousa?
DFM: [...]
Professor: Todo mundo ouviu o que a DFM falou? Sim. Então vamos colocar na lousa. Tem mais alguma propriedade que vocês podem relacionar aí. Eu gostaria que vocês explorassem um pouco mais o comentário da DFP.
Aluna: Sobre a parte [...]
Professor: O que significa? E a onda ela é destrutível?
Alunos: [...]
Professor: Então há uma propriedade aí que existe na partícula onda e não existe na partícula, existe na partícula e não existe na onda que é o que?
Aluno: Não sei
Aluna: Mas de falar que sofre interferência e não sofre, já não está falando isso?
Professor: É, mais eu quero que vocês cheguem a uma outra noção. Então do ponto de vista gráfico como é que vocês distinguiriam essas duas representações que nós fizemos na aula passada e também baseada nos textos que nós lemos, né. Nós fizemos duas equações na aula passada, uma para partícula e uma para onda, lembram disso?
Aluno: [...] a soma das duas unidades
Professor: No caso de que objeto?
Aluna: Partículas
Professor: E no caso da onda?
Aluna: Raiz quadrada...
Professor: Essa equação, ela é uma equação o que?
Aluno: ...
Professor: E o gráfico era um gráfico que [...] o que é que se somava... DFU?
DFU: Unidades...
Professor: E no segundo gráfico?
DFU: Intensidade
Professor: Ok, que que tinha então? No primeiro gráfico nós fizemos uma representação de...
Alunos: Probabilidade
Professor: E no segundo caso nós fizemos uma representação de que?
Alunos: Intensidade
Professor: Vamos então colocar essas duas equações no quadro, OK! Então no primeiro caso, no segundo caso perdão..., no caso de ondas nós representamos que propriedade, exatamente?
Professor: Repita por favor!
Professor: Intensidade. E no primeiro caso nos representamos?
Alunos: Probabilidade
Professor: Probabilidade. Por que é que nós não representamos intensidade nos dois casos?
Aluna: Eu acho que tem que ter, eu não sei falar certo assim, que nem uma luz ela pode ser mais forte ou ela pode ser mais fraquinha, isso eu acho que é intensidade. O que é a característica da onda, já uma partícula vai ser do mesmo jeito sempre, ela não vai ser uma partícula mais gorda ou mais menorzinha, ela vai ser uma partícula só, por isso que o caso dela vai ser probabilidade, é onde ela vai estar, já a onda não a intensidade dela vai ser mais forte.
DFP: [...] Partícula é uma coisa independente, ela sozinha, tudo que ela tem, energia, forma, tudo independente e a onda não, ela se comporta como se ela fosse um cordão com várias partículas, várias partículas. E aí [...] cada uma por si, e na onda não!

Professor: Quem mais gostaria de comentar? O que vocês acham, quem concorda com a DFJ... DFP? Quem discorda?
Professor: Não sei se sei, não sei se não sei!
<risos>
Professor: Há uma diferenciação clara... se nós tivéssemos que usar para tentar diferenciar essas duas unidades em termos de continuidade nós diríamos o que?
Aluna: Que a onda...
Professor: Que a onda é?
Aluna: [...]
Professor: E a partícula?
Aluna: [...]
Professor: A onda é?
Aluna: [...]
Professor: E a partícula?
Aluna: [...]
Professor: Ela é um evento do que?
Aluna: Descontinuidade
Professor: Fala de novo DFP
DFP: A onda é continua e a partícula é descontínua
Professor: Ok, a onda é contínua e a partícula é descontínua, então partícula descontínua, tem mais alguma propriedade que a gente pode buscar nas representações de vocês?
Na primeira atividade, não sei se vocês vão se lembrar, mas vocês representaram projéteis, logo de cara eu peguei duas figuras dos projéteis, mostrei pra vocês, e perguntei: o que é que representei aqui, que o outro não representou?
Aluno: [...]
Professor: Ok, todo mundo lembra dessa [...] e no caso da onda como é que ficou essa representação?
Aluno: Mínimos e máximos.
Professor: Mais [...]
Aluno: [...] A partir da fenda
Professor: E como é que vocês definiram a trajetória da onda?
Alunos: [...]
Professor: E o que difere uma trajetória de partícula, da trajetória..., vamos dizer assim, de uma onda?
Aluna: [...] Partícula retilínea [...] a onda pega uma área, e não vai pegar uma linha, igual uma partícula, que nem ela falou.
Professor: Em outras palavras, qual a diferença entre a representação da trajetória de uma partícula e a trajetória de uma onda?
Aluna: Da onda é tridimensional...
Professor: Em outras palavras, a partícula pergunto: tem uma trajetória definida claramente a partícula?
Alunos: Tem
Professor: E a onda?
Alunos: Não
Professor: Ok, algum comentário acerca disso daí? Então nós temos partículas com trajetória definida, e onda com trajetória indefinida, tem uma outra propriedade que nós vamos explorar aqui um pouquinho, mas eu acho que vocês vão ter alguma dificuldade para compreender sem que eu faça uma representação na lousa. Vamos imaginar aqui a superfície do oceano ok, com essas ondulações. Esse... Essas ondulações caminham, por exemplo, para cá (aponta no quadro), não sei se vocês já tiveram esse tipo de experiência, mas ela é possível de ser feita em casa, no tanque lá de casa. Aí nós colocamos aqui uma pequena bolhazinha, uma bóia, uma bóia sinalizadora, por exemplo. E nós temos lá as ondulações. A pergunta que eu faço pra vocês é a seguinte: esse objeto aqui, (mostra na lousa) se move prá lá?
Alunos: Não
Professor: E agora aqui eu coloco o canhão e ele dá um tiro, este objeto se move prá lá?
Alunos: Não
Professor: Bom, se nós colocarmos naturalmente aqui o motor, né..., em que essa onda colide continuamente com a pá desse motor, uma hélice ou alguma coisa toda, esse motor vai acabar por fazer o que, gerar o que?
Alunos: Energia
Professor: Energia, então, esse sistema aqui, esta entidade, ela transporta o que?
Aluno: Matéria
Professor: E a entidade de baixo, transporta o que?
Aluno: Energia
Professor: Ficou claro essa distinção? Alguém quer comentar alguma coisa? Ok.

Então, aqui nós temos transporte de matéria e transporte de energia?
Aluno: [...] energia
Professor: Transporta energia também, transporta energia também [...]
Aluno: Cinética?
Professor: Transporta energia cinética, perfeitamente. Perfeito [...] Também transporta energia, no entanto esse sujeito, esse cidadão só transporta o que?
Alunos: Energia
Professor: Exclusivamente energia, não podemos dizer que a entidade de cima transporta exclusivamente matéria. Tranqüilo, mais alguma... algum questionamento?
Então vamos assistir a terceira e última parte do filminho!
Alunos: Êêêêê...
Professor: Querem?<risos>...
Professor: Oi?
Aluna: Falha do organizador...
Professor: É verdade, Mais uma né... DFF.
DFF: É um...
Professor: [...] acho que é melhor acender, pois o DFE está muito perto da DFJ, o braço dele já estava lá...<risos> Eu flagrei ali<risos> Ok, podemos assistir aí?
Alunos: Podemos.
Assistindo ao vídeo
Professor: Que coisa estranha!
Alunos: [...]
Professor: Bom, quantos de vocês entenderam o texto falado né, ou a história do experimento que nós [...]
Aluno: Tratou como onda, e depois como partícula
Professor: Fala DFR.
DFR: Ora como onda, depois partícula
DFJ: Eu entendi que a partícula é indestrutível, só que alí não, a partícula alí é destrutível, então ele se separava, ela se fragmentava, e isso é comportamento de onda, então a partícula ela se comporta como onda, e ora a onda se comporta como partícula. É isso que eu entendi.
Professor: Mas [...] um aí?
Aluno: Eu entendi que se comporta como onda, mas prá eu pensar em como, eu não conseguiria ter um como assim, o elétron se separar, quebrar, é isso que eu não [...], até onde eu sei não acontece.
Professor: Não dá prá compreender o filminho assim numa primeira assistida, sem prestar atenção no inglês e com calma.
Alunos: ...
Professor: Não tem importância. Vamos ver o texto então, que nós vamos compreender o experimento. Pessoal, a pergunta nossa agora é a seguinte: Nós vamos trabalhar em cima do texto. vocês querem um intervalinho e voltar, ou ir numa tacada só?
Alunos: Numa tacada só.
Professor: Numa tacada só, ok!
Distribuição do texto
Professor: Ok, todo mundo tem?
Professor: Bom, vamos lá então, um experimento com elétron, texto.
Professor: Novamente nós temos a mesma situação, um canhão com elétron, uma parede com duas fendas e um nteparo como um detector e algumas curvas matemáticas representadas aí. <texto> Experimento antecipatório de pensamento.
DFF: [...]
Professor: [... <texto> Fala DFN!
DFN: [...] <risos>
Professor: Agora deu uma enrolada, DRB, o que você achou disso? [...] Criançada! Alguém quer fazer algum comentário sobre isso? <texto> Então vamos dar uma olhadinha aqui na esquerda, e a gente observa as curvas p da figura 1.4 ok? Registrando os clics nas colunas, nós obtemos... o resultado não é nada surpreendente. <texto> Então o resultado que nós obtemos nesse caso, é o mesmo resultado que nós havíamos obtido quando nós fechamos uma fenda e depois fechamos outra fenda... Compreenderam essas proposição que está sublinhada aqui. Eles se comportaram de que modo?
Alunos: [...]
Professor: Eles se comportaram do modo que nós esperávamos que eles se comportassem. Ficou claro? Quando nós acendemos a lâmpada, nós estamos executando experimento como se o quê?
DFP: [...]

Professor: Como se estivéssemos fazendo o que com as fendas, fechando uma delas? Compreenderam isso? Surpreendentemente se apagarmos a luz, o padrão de interferência se restabelece e... se apagarmos a luz volta o fenômeno de interferência!
Alunos: [...]
Professor: O DFN não gostou<risos> [...] Vocês perceberam isso?
DFP: [...]
Professor: Fala DFP.
DFP: [...]
Professor: O elétron...
DFF: Não tem como [...]
Professor: Vamos avançar. <texto> Então se nós temos um monte de elétrons passando ali pelas fendas, mas a lâmpada está emitindo menos fótons, o que que acontece, diminui a probabilidade de acontecer o que?
Alunos: Choque [...]
Professor: Fala DFT.
DFT: O choque dos fótons e dos elétrons, compreende..., naturalmente eles perdem flashes, mas ouve o clic do detector porque o elétron passou sem ser visto pela lâmpada. Ok? Você quer trocar a fita, Neide?
Neide: Pode continuar, enquanto troca a fita.
Professor: Estivemos fora do ar por alguns instante devido à problemas técnicos, já
estamos retomando nossas atividades normais. <texto> Ok!
DFJ: Professor eu não estou entendendo pra que saber através de qual fenda o elétron passa!
Professor: A sua pergunta é muito boa, no experimento com ondas, porque que a pergunta sua... Fala DFF.
DFF: [...]
Professor: Claro, sem dúvida nenhuma, agora, a pergunta da DFJ. Qual o interesse ao final de contas em saber se ele passa pela fenda 1 ou pela fenda 2, alguém pode dar alguma sugestão aí? Por que que é interessante saber isso?
DFT: [...]
Professor: Fala DFT
DFT: Interferência.
PR: Professor, sabe o que eu não entendi? Essa lâmpada aqui que [...] pela fenda 1 e pela fenda 2, estava após a barreira dos [...] se ela causava [...] ou não, ela causava após esses [...], se ela causava após esse, então quer dizer que é possível afirmar se ela passa pela fenda 1 ou pela fenda 2 [...] (final da primeira fita).
DFJ: Por que DFP, você pode fechar uma porta tanto pela frente dela, como por trás dela.
Professor: Deixa eu explicar novamente o que vocês fizeram agora pouco.
Alunos: ...interferência...
Professor: DFP eu estou entendendo a sua argumentação, mas vamos voltar para as figuras e para o texto. As duas fendas abertas, a fenda 1 aberta...
DFP: Com luz ou sem luz as duas fendas?
Professor: Espera um pouquinho! Sem luz, sem luz, essa figura aqui, ela é gerada sem a lâmpada, então, quando nós temos as duas fendas abertas, o número de elétrons que chega nesse ponto é grande ou é pequeno?
Alunos: Pequeno
Professor: Pequeno, pequeno. Se nós tratamos o elétron como partícula, portanto, admitindo que passe ou por uma fenda ou pela outra fenda, quando nós fechamos essa fenda aqui, o que acontece? O elétron descobre que ela está fechada e vem todo mundo pra cá? Por que quando nós fechamos essa fenda, o número de elétron que passa nesse ponto aqui, o que colide nesse ponto aqui, o que que acontece? Aumenta. Então a pergunta que eu faço é a seguinte: como é que eu fechando essa fenda, posso aumentar o número de elétron que chega aqui?
DFP: Espera aí professor
Professor: Você entendeu DFP, a minha colocação.
DFP: [...] tá, mas voltando à colocação...
Professor: Ou dito de outra forma, só um minuto, dito de outra forma, abrindo as fendas, se esse sistema é um sistema de partículas, necessariamente aumenta o número de partículas que devem chegar do outro lado, bom e por que aqui esta diminuindo?
DFP: Professor, a [...]
Professor: [...] Por que que esta curva aqui, não é uma somatória p_1 e p_2? Espera a DFP terminar DFE [...], daqui a pouco [...]
DFP: O que a [...] então eu posso, nesse caso [...] de maneira a afirmar que quando eu acendo a luz eu estou tampando uma fenda [...]
Professor: É exatamente isso, Por quê? Por que o resultado das curvas que você obtém com a luz apagada é o que? (vai para a lousa) é esse aqui [...] só para concluir o raciocínio. E o resultado que você obtém com a lâmpada acesa, é qual?

Aluno: [...]
Professor: E esse resultado é obtido de que maneira?
Aluno: [...]
Professor: Com uma das fendas fechadas. Agora, se eu acendo a luz e mantenho as duas fendas abertas, eu obtenho que resultado?
Alunos: [...]
Professor: DFP, ok?
DFP: Era só ter falado que a interferência [...] é só fechar uma fenda [...]
Professor: A presença da lâmpada é equivalente a fechar uma [...] e isso está dito no texto, estando ou não a fenda1 ou a fenda2 aberta ou fechada!
DFP: Não que era a luz que causava [...]
Professor: A luz não fecha a fenda, ela destrói o padrão de que? (apontando para lousa)
Alunos: Interferência
DFP: Não [...], então espera aí, então volta no que eu falei, de novo, a luz não fecha a fenda?
Professor: A luz é mecânica ou não? Fechar uma fenda é uma ação mecânica.
DFP: A interferência é como se ela tapasse a fenda, não passa nenhum elétron pela outra fenda quando a luz está acesa!
Professor: Não é que não passa nenhum elétron pela outra fenda, o que é que você obtém quando você acende a lâmpada, obtém flash aonde?
DFP: [...]
Professor: [...] está no texto! Fala DFE.
DFE: Não é assim? [...] a quantidade de elétrons que chegava lá, era diferente nos dois casos, assim porque no ponto lá eu concordo, porque a direção da luz... depois que passava elétrons lá, a quantidade de elétron ia ser maior num determinando ponto. Só que não quer dizer que foi menos elétron prá lá...
Professor: Mas é uma dúvida de probabilidade.
DFE: Então eu achava que ia ser maior os picos do que a diferença total...
Professor: Você está entendendo que a altura mínima seria maior que a máxima?
DFE: Não, não, não, assim... especificamente naquele ponto. Naquele ponto há uma interferência...
Professor: Ah você está questionando a altura relativa dos picos de cima... Por que que a do meio é maior, e a das extremidades é menor?
DFE: Não, não [...] naquele ponto antes, quando era uma fenda só tinha maior quantidade de elétrons, mudou os elétrons que iam para aquele ponto, foram para outro ponto, que é o lugar que estava escrito lá, ou seja, [...] o ponto de interferência dos elétrons, que eles vão mudar a trajetória dele.
Alunas: Por isso que eu falo [...]
Professor: Claro
Aluna: [...] Na primeira tem uma fenda só aberta, então tá, se só tem um lugar aberto, é o lugar onde vai passar elétron, é aonde vai ter a probabilidade de passar o elétron. Agora, quando tem duas fendas a probabilidade divide, não a quantidade, a gente acha que entendeu que não era a quantidade de elétron, assim que nem [...] falou: naquele ponto quando tem uma fenda tem um máximo, e no outro quando tem duas é o mínimo, né, tava lá no gráfico, é só por que dispersou os elétrons, por ter justamente essas duas fendas, mas o número de elétrons [...] a gente não tinha entendido.
Professor: Eu entendi a sua dúvida, de qualquer forma se você quiser [...] nós temos que lembrar o seguinte: esta curva de probabilidade, é a probabilidade de chegada de uma partícula, [...] partículas inteiras, daqui a pouco nós vamos ver mais [...] de qualquer forma, diminui a probabilidade de chegada de elétron naquele ponto de mínimo, isso daí ficou claro prá vocês? Diminuir a probabilidade de chegada de elétron naquele ponto.
DFJ: Não, porque eu acho óbvio que isso vai acontecer, é isso que eu to tentando dizer, que é obvio mesmo que vai acontecer aquilo, não que seja um fato, sabe, não porque antes era uma fenda e tinha o máximo, mas agora é duas e tem o mínimo no mesmo ponto.
Professor: Então vêja, por que que quando a gente abre uma fenda, diminui a probabilidade de chegada de elétron num ponto que é muito, digamos, próximo a abertura da outra fenda? Essa é a pergunta! As fendas estão aqui, ok. (direciona-se para lousa) Deixa eu representar as fendas aqui mais ou menos para vocês.
DFJ: Ah tá, agora eu entendi!
Professor: Entendeu a dúvida DFJ?
DFJ: Aham.
Professor: Por exemplo, as fendas estão aqui. (volta para a lousa) Por que é que quando eu fecho isto, vamos supor estou fechando esta fenda, eu fecho esta fenda, eu fecho essa fenda, eu obtenho que curva? Esta daqui, Ok? Por que que o simples fato de eu abrir essa fenda, faz com que a probabilidade de os elétrons chegarem nesse ponto aqui ó (quadro) nessa posição x, que era essa daqui quando era uma fenda aberta, caia para esse valor com esta fenda também aberta, enquanto que no momento em que esta fenda estava fechada, a probabilidade de um elétron chegar nesse ponto era [...]

DFN: Eu achava [...] alguns elétrons iam nesse ponto, seriam [...] iam para algum lugar [...]
Professor: Só por que eu fechei aqui?
DFN: Não, não, porque está aberto, houve interferência entre os elétrons lá, e desviou o lugar [...]
Professor: Então vamos interpretar o seguinte: Eu estou com uma fenda só, o sistema tem uma fenda só, os elétrons estão passando por aqui e a gente obtém esse perfil de distribuição de probabilidade, ok?
Alunos: Aham
Professor: Aí eu vou lá, e faço isso (na lousa) abro isso. A pergunta é: por que que os elétrons que estão passando agora nisto aqui, não fazem, não tem esse perfil similar a este daqui, e que redunde em uma curva agora que seja a soma destas duas? Esse não era o resultado previsível, se nós estivermos lidando com partículas? Então por que o fato então, de eu abrir esta fenda, faz com que os caras que estavam vindo pra cá, não venham mais, como é que eles sabem que eu abri?
DFF: É exatamente isso, é como se eles pensassem [...]
Alunos: [...]
Professor: Está acontecendo que fenômeno?
Alunos: Interferência.
Professor: Mas nós estamos lidando, afinal com uma partícula ou uma onda?
Aluna: Os dois.
Professor: Ficou claro, então a partícula tem uma trajetória definida?
Alunos: Tem.
Professor: Tem, a onda tem trajetória definida?
Alunos: Não.
Professor: Então, vamos procurar ver o que está acontecendo, aqui (lousa) e aqui (lousa) para que a gente tenha esse perfil. No momento em que a gente coloca uma lâmpada aqui, para observar esses elétrons, nós estamos procurando o que do elétron?
Aluno: Trajetória.
Professor: E no momento em que a gente procura essa trajetória, ele vai se comportar como o que?
Aluno: Partícula.
Professor: E vai exibir portanto?
Aluno: [...]
Professor: Em outras palavras que propriedade particular?
Aluna: [...]
Professor: Que propriedade em particular?
Alunos: Sem interferência.
Professor: Ou, se nós procurarmos, que propriedade nós estamos procurando com a lâmpada?
DFT: [...]
Professor: Fala de novo DFT.
DFT: Trajetória indefinida.
Professor: E se nós acendermos a lâmpada, ele vai passar a exibir o que?
DFT: Trajetória definida.
Professor: Trajetória definida. Que é a propriedade que a gente está procurando.
Aluno: Com a lâmpada simplesmente faz com que ele perca.
Professor: Porque, isso nós vamos ver no final dessa discussão! Por que, (aluna: ...) [...] é difícil essa resposta... de alguma forma ela está atrapalhando, nós estamos observando um comportamento natural dessa partícula? O que nós estamos fazendo com esse comportamento?
Alunos: [...]
Professor: Nós estamos modificando esse comportamento! Ok. A partir do momento que eu acendo a lâmpada e começo a observar os flashes eu consigo examinar que tipo de propriedade exclusiva dessa entidade elétron aí?
Alunos: (pergunta)
Professor: Partícula. Ficou claro isso? Só por eu acender a lâmpada. DFP você está satisfeita ou não?
DFP: Não.
Professor: Ainda não? Volta para sua dúvida!
DFP: Não, quando acabar.
Professor: DFJ, você quer fazer mais alguma observação?
DFJ: [...]
Professor: No momento em que eu coloco uma lâmpada atrás da fenda, ela vai observar, por que afinal de contas a partícula passou por uma ou por outra, não é isso DFP, que você queria colocar mais ou menos em tese?
DFP: Metade da questão é isso.
Professor: Metade da questão é essa, é verdade, se ela passou por uma ou por outra DFP, ela vai ter interferência?
DFP: [...]

Professor: Não tem, esse que é o problema!
DFP: Professor, o meu problema, é que eu acho que não deveria ser feita a afirmação do último parágrafo, da última linha do penúltimo parágrafo!
Professor: Que página?
DFP: Página 9 <ver texto> [...] eu acho que essa afirmação não existe, está errada.
Professor: <texto> Quando você afirma que passou pela fenda 1 ou pela fenda 2, você está esperando um comportamento padrão de que tipo?
DFP: Não, eu sei, mas não precisava usar isso pra justificar o fato do gráfico 2.
Professor: Você está dizendo que não deveria usar isso, você está admitindo que afinal de contas passou por uma das duas fendas!
DFP: É por que assim, a lâmpada vai ser [...] só depois que passou, ela estando lá ou não, o elétron vai passar pela 1 e pela 2. Não é essa a explicação para isso.
Professor: Eu entendi sua colocação!
DFJ: Professor!
Professor: Fala!
DFJ: [...] e o que ele está querendo dizer só assim, o elétron vai passar pela fenda 1 e pela fenda 2, todo mundo sabe disso, ele não pode afirmar que esse elétron passou pela fenda 1, já se passou pela fenda 2, não é só isso que ele quer dizer? [...] quando o elétron não é observado, ele não pode afirmar por qual fenda ele passou, 1 ou 2, mas não que ele não passou pela fenda, não é só isso que ele quis dizer.
Professor: Tá faltando um dado, que o Feynman não discute no texto e que responde a pergunta da DFP.
DFF: Esse cara é burro prá caramba, ele omite um monte de coisa.
Professor: É tem um dado que está faltando aqui, que eu acho que o texto não deixou claro para vocês.
(Conversa)
Professor: [...] eu vou dar a informação para vocês. DFP, se passar um único elétron vai haver interferência.
Alunos: Dele?
Aluna: Da luz ou dele?
Professor: Não, Se passar algum elétron vai haver interferência, (DFP: então...) ou seja, vamos voltar para o experimento de interferência de ondas, o experimento de interferência aconteceu quando, quais as condições para que houvessem interferência ou as condições para que não houvesse interferência. Fala.
DFE: [...]
Professor: Não se lembra?
Aluno: [...]
Professor: Portanto, quando são geradas as ondas, em que posições, em que momento?
Aluna: [...]
Professor: Em que momento? Simultaneamente, tá ok? A interferência é um fenômeno ondulatório decorrente da interferência no fundo né, da inter-relação de duas ondas que são geradas. Quando tinha uma fenda única aberta havia interferência?
Aluna: Não.
Professor: Qual a condição necessária para que houvesse a interferência?
Aluna: [...]
Professor: De que passasse ondas por onde?
Alunos: Pelas duas fendas.
Professor: Se passar um elétron, há interferência?
Aluno: Por uma fenda.
Professor: Para piorar a situação é esse o detalhe que não estava escrito aqui! Na realidade o canhão de elétron trazia um elétron por vez, então passa um por vez. Como é que passando um por vez, seja pela 1, seja pela 2, na [...] vai acontecer interferência?
A sua argumentação DFP, esta corretíssima, a dúvida da DFP foi [...]
DFP: Ele ganhou um prêmio, professor?
Professor: Não sei, mas também ele não foi tão reducionista quanto está aqui, esse dado ele fornecia. Vocês querem que eu telefone... (risos)
Ficou claro agora então, talvez faltasse esse dado para vocês. Daqui a pouco nós vamos ver o experimento tá. Existe um experimento que tem na literatura, que se chama: interferência com um único elétron, é possível montar esse experimento, executar esse experimento com um único elétron. Agora, tranqüilizei um pouco DFP, amenizei a situação? Então tá bom, DFJ OK?
DFJ: Uhum
Professor: Podemos concluir nossa abordagem aqui pessoal? Ok, é nessa corda bamba que devemos caminhar. <texto> Compreenderam então, previsto teoricamente pela quântica, têm essas ondulações, ou seja, as ondas de interferência dos projéteis da metralhadora. No entanto esse perfil apresenta uma oscilação tão estreita que

nenhum detector consegue determinar, perceber essas oscilações rápidas e que acaba mostrando esse valor médio que foi representado à magnitude, ok. Aí a gente estuda esse princípio da mecânica quântica... logo logo <texto>
Aluno: [...]
Professor: Isto é, se antecipadamente os elétrons já tivessem feito essas escolhas nós deveríamos encontrar a soma das duas, e no entanto nós não encontramos <texto> No entanto, vamos tentar salvar a situação um pouquinho! <texto> Então tem uma [...] no sistema de fendas da figura 1.6, bem lá em cima e bem lá em baixo, tem uns rolamentozinhos! Checaram os rolamentos?
Aluno: [...] abertura.
Professor: Não não, não vai mudar a abertura, esse jogo todo pode subir e descer. Ok, vamos ver qual é a proposta prá gente obter uma saída. <texto> Então movem-se todas as fendas, ok. As duas fendas podem subir e descer, o conjunto todo. Ficou claro isso? O anteparo esta fixo ainda! <texto> Visualizaram a trajetória desse primeiro elétronzinho aí, passando pela fenda 1? <texto> Faltou fragmentos do texto... De qualquer forma o que acontece é o seguinte: [...] o princípio da incerteza [...] delta X = H/delta P, então se nós tentarmos observar o deslocamento da fenda pra cima e pra baixo, o que vai acontecer é que, a cada elétron que chega agora no sistema, o centro do arranjo, o centro do sistema de fenda está sempre numa posição diferenciada com relação ao elétron anterior, conseqüentemente nós não conseguimos conhecer o delta X, a deslocalização do arranjo experimental, portanto nós perdemos a informação acerca de através de qual fenda o elétron passou. Então se nós observamos o movimento da fenda nós determinamos o que? Determinando o delta P, quer dizer, a mudança de momento da fenda nós perdemos a informação acerca do delta X, o delta X fica maior do que a separação entre as duas fendas, portanto, nós não conseguimos julgar, afinal de contas, por que fenda o elétron passou. Ficou claro?
Então para nós observarmos o delta P, e a mudança do momento na lâmina, nós conseguimos observar o delta P e a mudança de momento da lâmina, mas nós perdemos a informação delta X, porque esse delta X vai ser maior do que a distância que separa essas duas fendas. Portanto, nós não conseguimos saber através de qual fenda, ok?
Então para finalizar. Pelo princípio da incerteza... <texto> Ok? Então, o fato de a gente mudar toda hora a fenda de posição, faz com que o padrão de interferência desapareça e novamente nós perdemos a informação [...] <texto>
DFP: Professor, é de 1963 esse artigo?
Professor: Este livro, foi escrito em 1963.
DFP: De lá para cá nada?
Professor: De lá para cá, foi realizado um experimento com um arranjo um pouco diferente, que foi filmado o etector, os elétron [...] foram jogados num osciloscópio e foi filmado a tela desse osciloscópio. É um filminho muito curto, vamos trabalhar comigo então. Enquanto o sistema aqui entra em aquecimento, vamos debater um pouquinho mais sobre tudo isso. O nosso problema no fundo é perceber o que acontece com os benditos dos elétrons quando interferem, interagem perdão, com as fendas e vão se projetar sobre o anteparo. Ficou claro isso? Nós vamos analisar as analogias que vocês fizeram, as representações de figuras que vocês fizeram, mas eu queria perguntar para vocês o seguinte: como vocês , de maneira geral, quando vocês fizeram as representações, essas representações de vocês foi tratando de elétron como partículas ou como ondas?
Alunos: Partículas.
Professor: Quem foi retratar como onda ou como partícula teve dificuldade pra representar que propriedades alí no espaço entra a fenda e o anteparo?
Aluno: [...]
Professor: Ok, que propriedade DFM, DFS, DFU, DFT? Trajetória, quem mais?
Aluno: [...]
Professor: Se for tratar como onda, se for tratar como partícula onda, vocês teriam condições de representar como trajetória?
Aluno: [...]
Professor: Como fica essa questão de fazer no papel uma representação de partícula onda?
Alunos: [...]
Professor: Pois não, DFP!
DFP: [...]
Professor: Bom, tá então se a gente interfere, se a gente tivesse colocado uma lâmpada, e vocês soubessem de tudo isso, se tivesse colocado uma lâmpada atrás da fenda, talvez até se vicie, mas no momento em que eu não coloco nada, nem a lâmpada, nem especialista consegue fazer a representação física desse comportamento?
Alunos: [...]
Professor: Fala DFN
DFN: [...]
Professor: Quem mais?

ATIVIDADE – SISTEMA COM ELÉTRONS
Data: 23/20/06 Turma II

Iniciando a atividade

Professor: Ok? Então, mais uma vez boa tarde a todos, agradecemos de novo a colaboração de vocês aqui na atividade que a NMM está desenvolvendo, lembrando mais uma vez que o direito de imagem e o direito de voz de vocês estão resguardados por uma legislação Federal, que regulamenta esse tipo de atividade e outras que a gente está exercendo aqui.
Bom, nós vamos retomar hoje fazendo uma discussão um pouquinho mais ampla em cima dessa proposta de trabalho, voltando mais uma vez à discussão do significado de fazer aquilo que vocês fizeram nas aulas anteriores, e fazer uma representação física num sistema que nós não temos realmente montado aqui. [...] não existe na realidade nada montado nessa aproximação... Então ele se constitui naquilo que nós chamamos experimentos pensados, ou experimento de pensamento.
Bem, quando a gente fala num experimento de pensamento, nós temos que avaliar bem o que significa essa expressão: Porque quando vocês vão para um laboratório executar alguma atividade experimental vocês têm que pensar, portanto todo experimento rigorosamente ele é pensado, até no momento em que ele é criado nós temos que planejar o experimento, e entrar no laboratório, não começa por eu vou, eu vou entrar, vou fazer uma observação e vou descobrir alguma coisa. Não, a ciência não começa com a experimentação. A ciência começa com, se é que a gente pode dizer o início da ciência, de qualquer forma, quando a gente vai fazer um experimento nós temos que planejá-lo. Portanto, temos que antecipadamente elaborar esse experimento na nossa mente para que ele seja conduzido num sentido de nos mostrar resultados que a gente possa, imagina poder conseguir com determinados experimentos. Então nesse sentido todos os experimentos têm que ser pensados.
Bom, quando nós não temos à disposição um laboratório e nós vamos executar esse experimento no papel, que foi o que vocês fizeram, nós temos um experimento do tipo antecipatório, nós criamos o experimento pensado na medida que, embora nós pudéssemos executar o experimento que foi feito até aqui pelo menos como projeto... dentro do laboratório, nós não fizemos. Então nós tiramos vocês do ambiente de laboratório e trouxemos aqui, mas simulando a possibilidade de um experimento, então nesse sentido, o que nós fizemos também foram experimentos pensados. Ora, é claro que nós podemos ir para um ambiente, fazer um aparelho com uma fenda ou duas, pegar uma metralhadora e sair dando tiro nessa parede e ver o que acontece na parede que está do outro lado e podemos observar e comparar efetivamente o resultado experimental... com aquele que vocês fizeram, com aquela previsão que vocês fizeram. Nesse sentido, os dois primeiros sistemas que nós trabalhamos são sistemas antecipatórios, isto é, eles permitem antecipar o resultado que vai acontecer. Como eu comentei com vocês esse tipo de experimento ele é exaustivamente utilizado em ciência, sempre, pelo menos na proposta de Galileu, que tem sido bastante utilizada essa proposta, essa metodologia, para que a gente ganhe conhecimento em ciência. Então, embora os experimentos pensados de projétil e de onda supostamente nenhum novo conhecimento foi adquirido aqui, porque muito provavelmente aquilo que foi debatido, eram conhecimentos que vocês tinham ou deveriam ter, geralmente os experimentos pensados serviram para que a gente consolidasse aquilo que nós imaginamos como propriedades importantes, quando estamos observando partículas, e aquilo que nós entendemos como propriedades importantes, quando estamos observando ondas... Então teve por exemplo, é o que nós esperamos... teve essa possibilidade de vocês, se não adquirirem novos conhecimentos, mas pelo menos consolidar o conhecimento da maneira que depois fica fácil da gente confirmar todo o conhecimento para partícula e para onda dentro de uma tabela relativamente simples ali...

Experimentos com elétrons

Professor: Bom, e o experimento com elétrons? O experimento com elétrons até pouco tempo atrás, ele foi um experimento de pensamento não antecipatório. Ele foi criado pra se compreender o comportamento quântico, efetivamente é isso, mas ele não foi até pouco tempo atrás, ele não era até pouco tempo atrás, um experimento que pudesse ser executado. Vamos pensar em outras situações de experimentos pensados, que pelo menos até o momento não podem ser executados. Se a gente for prá física, talvez vocês já tenham ouvido falar de um problema que o Einstein coloca que é chamado paradoxo dos gêmeos. Mais ou menos dois gêmeos... duas pessoas nascidas no mesmo dia e até na mesma hora, só que uma dessas pessoas embarca num foguete muito rápido e viaja para o espaço numa velocidade muito próxima a da luz, quando esse viajante retorna constata que ele envelheceu bem menos que o irmão dele, pelo fato dele estar acelerado em movimento numa velocidade bem próxima a da luz.
Bem esse tipo de experimento é impossível de fazermos, pelo menos não com seres vivos, com outros artifícios possivelmente sim, com relógios atômicos, em outras circunstâncias sim, partículas atômicas, mas não com pessoas. Então concluir o resultado que se obtém, os resultados que se obtém desse tipo de experimento é uma

coisa que só pode ser feita na medida em que nós pensamos, aplicamos conhecimentos da física de Einstein a essa situação e façamos a previsão do resultado, antecipemos esse resultado, embora o experimento ainda não possa ser feito. Outros experimentos pensados a gente pode imaginar na química, por exemplo, a possibilidade de a gente ter um sistema que consiga, vamos imaginar, estou tirando do nada, da minha cabeça uma hipótese. Queremos compreender um mecanismo de reação química. Bom, pra eu compreender um mecanismo de reação química claramente, vamos ver se a gente consegue isolar duas moléculas no espaço e observar o que acontece quando uma das duas se aproxima para ver se vai haver quebra de ligação, reformatação e outras ligações. Não dá para fazer um experimento desses e ainda observar o que está acontecendo. Mas nós podemos prever alguns resultados no momento em que a gente discute se o reagente A vai se aproximar do reagente B, segundo uma certa estereoquímica... de aproximação, e por aí vai. Ok?
Então, nós temos o uso dos experimentos pensados em diversas situações e em outras que eu já comentei aqui. Então, a idéia até o momento foi discutir o uso desses experimentos pensados prá gente ter algum ganho científico. Na atividade passada vocês executaram um experimento de pensamento levando em conta agora o comportamento do elétron quando vai passar por uma fenda ou por duas fendas. E é como eu falei, esse experimento não tinha sido executado até pouco tempo atrás, portanto agora ele [...] .Então nós vamos primeiro ver uma animação, aquela animação que nós estávamos vendo até então, agora com um sistema com elétron. E vamos ver o que, que o nosso simpático tiozinho quântico... tem a nos falar sobre ele.

Professor: É claro que eu vou, que eu não vou começar o filminho do ponto em que nós paramos até porque a gente tem a oportunidade de rever outro sistema.

"Animação"

Professor: Agora ele vai fazer..., nesse momento eu parei um pouco por quê? Porque agora o nosso professor aí vai fazer uma compilação de dois fenômenos importantes pra cada um do sistema, mais ou menos como nós fizemos. Então, essa primeira frase que ele acabou de falar, então, quando nós atiramos coisas, isso que ele falou não é: When you through things... isso é matéria, quando nós atiramos matéria sobre aquelas duas fendas nós obtemos essas bandas ali, um padrão de interferência. E agora a gente vai para um mundo bem menor. Alguém de vocês entendeu essa frase? Ele tá colocando como hipótese um elétron como partícula.

"Animação"

Professor: Que comportamento que ele detecta quando a gente tem uma fenda? Tá... Vocês reconhecem que comportamento aqui?

Alunos: Particula

Alguém questiona? Ok? Então tá.
Então a gente vai para esse filminho agora e vai ver, isso é uma animação, evidentemente, e a gente vai ver se corresponde à realidade, de que maneira? Nós vamos ver o resultado experimental obtido por um grupo de cientista no Japão, numa empresa conhecida que é a "Hitachi". Mas antes da gente ver o resultado da Hitachi, tem um endereço eletrônico aqui que depois caso vocês queiram a gente passa prá vocês. Então, está aqui, experimento da dupla fenda. Então, os pesquisadores da Hitachi, eles elaboraram um sistema experimental bastante similar àquele que nós estamos estudando, portanto ele tem algumas diferenças, no seguinte sentido: nós temos aqui uma fonte de elétrons, isso aqui é uma fonte de elétrons, um sistema todo eletrônico, ele é mantido sobre vácuo, aqui nós temos um arranjo experimental que se chama bi prisma de elétrons. O que é um bi prisma de elétrons? O elemento mais importante desse bi prisma de elétrons é esta barrinha horizontal, perdão, vertical que vocês estão vendo aí. Então percebam, em primeiro lugar o arranjo experimental, ele joga elétrons para o sistema na direção vertical. No nosso filminho anterior, na nossa animação anterior e nas representações que nós pedimos pra vocês, esse sentido era horizontal, mas isso evidentemente não muda nada, como é que é o sistema aqui então? Os elétrons... a partir dessa fonte de elétrons, lá na frente, ao invés desses elétrons encontrarem um par de fendas, vão encontrar um poste ali na frente, ok? Uma barreira física ali. E a partir daí a gente vai observar os resultados, que ao invés de ter duas fendas para o elétron passar, o elétron pode passar ou pela esquerda ou pela direita daquele arranjo físico, daquele obstáculo que se coloca na frente dele, conforme o experimento é executado. Por fim, nós temos aqui um detector de elétrons, esse detector está conectado a um circuito eletrônico tal e nós observamos aqui no osciloscópio a distribuição de probabilidade em que esses elétrons alcançam o detector. Ok? Na compreensão do arranjo experimental montado pela Hitachi.
Então agora a gente pode ver essa página aqui, ela contém alguns dados técnicos desse arranjo experimental, por exemplo: os elétrons são acelerados por 50.000 volts, portanto eles adquirem uma energia de 50.000 eletronvolts

e isso corresponde a velocidade de cerca de 40% da velocidade da luz, ou, 120.000 km/s. Esta é a velocidade dos elétrons, ok?
Bom, vamos então ver o resultado que a Hitachi obteve.

Bom, antes de a gente continuar... essa imagem que está aparecendo aqui é uma filmagem direta da tela do osciloscópio que trouxe resultados do sistema, o arranjo. Traduzimos os resultados do detector para a tela do osciloscópio, o que que vocês acham? O que, que vocês têm a me dizer sobre o significado desses pontos aí que apareceram no osciloscópio?
DFC: Cada ponto corresponde a um elétron?
Professor: O DFC acha que cada ponto corresponde ao elétron. O resto concorda, discorda?
DFC: [...]
Professor: Nós vamos continuar falando dessa palavra que ele usou: corresponde, ou não é bem corresponde? Nós vamos discutir aqui na minúcia, esse experimento aqui, a gente não pode ter muita pressa agora não. Cada ponto efetivamente, eu vou formular a pergunta de tal maneira que você possa responder melhor DFC. Cada ponto ali, é um elétron?
DFC: Seria...
Professor: É o elétron, quer dizer, o que nós estamos olhando, aqueles pontinhos mais claros, cada um daqueles pontinhos é um elétron? O que, que vocês acham? Nós estamos olhando os elétrons ali? Essas imagens ali são elétrons?
DFG: Não
Professor: Então cada imagem ali, cada ponto clarinho que apareceu sobre essa tela não é um elétron, todo mundo concorda com isso? Então, de fato..., mas existe alguma coisa entre cada ponto e cada elétron que o DFC falou agora pouco, que expressão ele usou?
"Aluno"
Professor: Uma outra expressão que você tinha usado mas não gostou, você resolveu reformular.
"Aluno"
Professor: Ok! De fato, cada ponto corresponde a um elétron? Sim, cada ponto corresponde a um elétron. Então veja, a primeira coisa importante aqui que nós vamos voltar a discutir lá na frente é o seguinte: o nosso experimento ele não nos mostra os elétrons, porque os elétrons na realidade, não vão aparecer diretamente na tela do osciloscópio, para nós, mas entre o osciloscópio e o próprio elétron tem um equipamento, que equipamento que é esse?
DFC: Detector
Professor: Fala de novo DFC.
DFC: Um detector.
Professor: Um detector, então existe um fato físico ali, que transforma um fato analógico, que é a colisão do elétron seja ele, que for com o detector, transforma isso num resultado que a gente possa visualizar aqui, Ok? Então, nesse arranjo experimental, esses elétrons estão sendo detectados como o que?
DFI: [...]
Professor: Alguém duvida? Você está falando isso justamente pelo que?
Aluno: [...] um choque de massas [...]
Professor: Ou seja, está havendo uma correspondência entre cada ponto e cada elétron, ok? Então o sistema está aí, esse nosso arranjo está ok. Esse nosso arranjo experimental está detectando o elétron... como o que?
DFC: [...]
Professor: Pode falar de novo DFC.
DFC: Partícula.
Professor: Como partícula, ficou claro isso para vocês? Soltem-se, podem ficar à vontade, podem chutar, podem errar, não tem problema nenhum tá. Muito bem..., então vamos dar mais uma continuação.
"Animação"
O que aconteceu no final do experimento?
DFG: [...] de elétrons.
Professor: Esse padrão passou a ser um padrão de que?
DFG: De onda
Professor: Ok? Um padrão de onda, em algum fragmento, alguma parte do texto, eu não sei se vocês compreenderam o autor, possivelmente não, eu não sei quantas vezes vocês ouviram um japonês falando inglês, foi o caso agora. Nós temos um japonês.
(Seria importante compreender a duvida do DFC aqui!)
Professor: Oi?
DFC: [...]
Professor: Aleatório.
DFC: [...]

Professor: Isso.
DFC: [...]
Professor: É na realidade..., esse fragmento..., só um minutinho.
"Animação"
Professor: Eu não sei parar esse filme... Vamos discutir isso aqui um pouquinho mais adiante viu DFC, deixa eu só pegar um trecho importante aqui.
"Animação"
Professor: Olha, na realidade este experimento, este resultado experimental, ele era previsto, ele era previsto, mas no entanto, até a data em que a Hitachi executou o experimento, não se tinha obtido esse experimento, Ok? O experimento efetivamente comprova uma antecipação que tinha sido feita a partir do resultado experimental, a partir do experimento de pensamento, não sei se era essa sua dúvida DFC, eles não se surpreenderam com o resultado, na realidade tentou se executar o experimento justamente porque se previa que o resultado fosse esse, Ok?
Bom, nós temos no final das contas então um resultado que mostra um padrão de que?
DJA: [...]
Professor: Fala DJA.
DJA: Interferência
Professor: Só que esse padrão de interferência, como ele foi se formando? Foi se formando na tela do osciloscópio da Hitachi, ele foi se formando a partir do que?
DJA: [...]
DFC: Do choque de elétrons.
Professor: Do choque de?
DMM: Elétrons
Professor: Que foram detectados como o que?
DAS: Partículas
Professor: Como partículas individuais, não sei se vocês perceberam isso. Então nós temos um padrão de interferência, que é um padrão similar àquele gerado por luz, por exemplo. Eu sei que vocês trabalharam com luz, interferência de luz no laboratório de física, ele é formado do mesmo jeitão que o padrão de luz ali, olha o formato e a distribuição de ondas de bandas ali né, de interferência, de brilho máximo e mínimo. É até similar, mas quando a gente olha para aquele feixe de luz, a gente observa que diferença com relação a essas figuras que estão aqui? Essas figuras elas são o que? Essas faixas, cada uma dessas faixas, são perfeitamente lisas e homogêneas? Elas são o que? Foram geradas pelo que, no osciloscópio?
DJA: [...] (Importante saber a fala)(24min 12seg)
Professor: Nós temos uma granulação na figura. No caso da observação do experimento com luz, nós temos essa granulação? Não, não temos essa granulação. Então nós temos aqui um exemplo de que sistema que está gerando interferência ou que entidade física que está gerando interferência?
Aluno: [...]
Professor: Uma entidade física que está sendo detectada como o que?
DJF: Partícula
Professor: Como partícula?
DJF: [...] partícula
Professor: A partícula, a detecção da partícula, as partículas estão exibindo um padrão de que?
DJF: Padrão de onda
Professor: Um padrão de onda! Era previsto esse resultado?
DJF: Acho que sim.
Professor: Por quê?
DFG: Ah porque, [...] é um caráter ondulatório dos elétrons que são no máximo muito pequeno.
Professor: Então, mas nós tratamos, se a gente faz um experimento com uma fenda, o resultado é o que? É similar ao comportamento de uma onda ou é similar ao comportamento de uma partícula?
DJA: Partícula
Professor: E partícula deve exibir interferência?
DJA: Não
Professor: No momento em que a gente coloca duas fendas, surge um padrão que é típico de que sistema?
DMM: De onda
Professor: De onda, muito bem, Ok? Até aqui aparentemente não tem nada de muito assustador por quê? Porque afinal de contas vocês cansaram de aprender comigo que o elétron é uma partícula onda, no fundo é isso daí. Agora vamos tentar entender como é que se produz o padrão de interferência, como é que pode se produzir um padrão de interferência de ondas, entre partículas. Vamos voltar pro filme anterior assim que eu conseguir remover, se é que eu vou conseguir remover essa tela. Vamos observar um bocadito mais.
"Animação"

Professor: Então, ele faz essa pergunta, como pode um conjunto de partículas criar um padrão de interferência como ondas, ok? Lógico que ele admitiu o pressuposto que os elétrons são partículas conforme a gente viu no começo do filme.
"Animação"
Bom, ele diz o seguinte; possivelmente essas partículas estão interferindo entre si, criam um tipo de ondulação que provocam a interferência entre si. Alguém de vocês trouxe essa discussão na atividade passada, quem foi?
Aluno: [...]
Professor: É da hora que as partículas passam pela fenda, elas interferem de alguma forma em função desse comportamento ondulatório, quem foi que fez essa observação?
DMM: Fui eu.
Professor: Foi o DMM, Ok? Então isso aqui naturalmente também é uma espécie de experimento de pensamento, porque nós não temos um canhãozinho de elétrons, mas observe o que está acontecendo com a emissão de elétrons nesse canhãozinho aqui.
"Animação"
Professor: Um por vez, Ok?
"Animação"
Professor: Portanto não há como eles interferirem um com o outro.
"Animação"
Professor: Se os elétrons estão sendo emitidos um por um, separadamente, segundo essa concepção da interferência entre dois elétrons é possível haver o padrão de interferência?
Aluno: [...] (Importante tentar entender a fala aqui)(30min 54seg)
Professor: E no entanto, depois de um certo tempo de experimento, está lá o padrão de interferência. Inclusive o DFE estava aqui na atividade passada e eu me lembro que entre o DFE e o DMM houve essa discussão, alguém de vocês falou o que? O que é importante no caso da ocorrência da interferência, no caso da onda? No experimento de onda, nós tínhamos duas fendas, e vinha vindo a onda, o que foi chamado a atenção, não sei se foi o DFG, para que houvesse padrão de interferência no momento em que aquela primeira onda atinge aquelas duas fendas ali. Alguém de vocês falou uma coisa importante, acho que foi o DFE.
Aluno: Eu tinha dito que se fosse um elétron na frente do outro, acho muito difícil que ele fique no meio, porque não seria as duas ondas juntas.
Professor: Portanto elas têm que se originar... na sua concepção tinha que se originar o movimento simultaneamente nas duas fendas, ok? No entanto, se a gente faz o experimento removendo essa simultaneidade, isto é, lançando um projétil ou um elétron por vez até lá, o que vai acontecer ao final de um certo tempo? Um padrão de interferência.
DMM: A onda ela vai no experimento de duas fendas, ela é uma onda só que ela se divide em dois, por isso surge interferência, o elétron se pensar como partícula, ele não vai se dividir em dois, quando passa pela fenda.
Professor: A gente pode refletir sobre essa hipótese. Vamos refletir sobre essa hipótese dele se dividir em dois.
DFG: Porque pensa como ele vai causar interferência, pra causar interferência são dois...
Professor: Duas entidades.
DFG: Duas entidades, o elétron vai chegar ali, tá em uma fenda e vai se dividir para ir para outra fenda... É o que gente pensa.
"Animação"
Professor: Se for assim tudo bem, mas dá pra imaginar que a idéia seja essa?
DFF: Acho que não
Professor: O que o DFC acha?
DFC: [...] (Tentar entender)(33min 22seg)
Professor: Tá um pouco forçado aí?
"Animação"
Professor: Matematicamente isso é muito estranho, diz o nosso amigo aí, alguma coisa nesse sentido. Por quê?
"Animação"
Professor: Como é que pode então o elétron passar ora pelas duas fendas ou ora por uma ou ora por outra e ora por uma e ora por outra, faz sentido isso? Então como é que faz agora prá gente resolver esse dilema? Como a gente resolve esse dilema de procurar entender, como é que um objeto que foi detectado lá no experimento da Hitachi, foi detectado como o que?
luno: Partícula
Professor: Como partícula, exibe um padrão de interferência. O que vocês sugerem como saída prá gente tentar? Vocês podem inventar qualquer coisa prá tentar solucionar isso daqui, do ponto de vista de experimento, vamos supor que nós tenhamos poderes ilimitados pra tentar resolver essa questão aí, uma sugestão, qual seria a melhor maneira de a gente descobrir como é que esse padrão de interferência está se formando? Podem dar as sugestões mais escabrosas, afinal de contas nós estamos pensando no experimento.

Quem tem uma saída para a gente resolver esse dilema, de descobrir se esse elétron, afinal de contas está passando por uma fenda, por duas, pelas duas, se ele se divide e depois ele se rejunta, quem pode dar uma sugestão aí? Qual seria a situação ideal para a gente descobrir isso?
DFC: Fazendo um experimento.
Professor: Fazendo o experimento, então, o experimento já foi feito, um arranjo físico pouco diferente, mas ele já foi feito, ele já mostrou o que? Um padrão de interferência entre partículas. Afinal, por onde esse elétron passa? Como que ele passa, como que ele sozinho, mesmo que passe um por vez, exibe interferência? Se a gente tem uma fenda não há interferência, se a gente coloca duas fendas há interferência, ok?
DMM: [...] que a massa dele passa pela fenda, gera um campo...
Professor: É, antes da gente pensar nessas [...] DMM, tenta dar uma solução muito mais simples para esse problema que nós poderíamos naturalmente, mas é impossível executar esse experimento. Mas prá gente descobrir por onde ele passa, o que seria o ideal?
DMM: ...
Professor: Como?
DFC: Detectar a posição...
Professor: Detectar a posição e a velocidade dele, qual seria mais tranqüila, que daria menos trabalho para detectar a posição e velocidade dele? Se nós pudéssemos o que?
Aluno: [...]
Professor: Mais simples ainda.
Aluno: [...]
DFC: [...] princípio de Heisenberg.
Professor: Então, mas é assim, o que a gente faz quando..., vamos supor que nesse momento aqui, tá passando um carro ali pela avenida e eu quero medir a velocidade dele. Peço para o DFG medir a velocidade dele. DFG, o que você teria que fazer para medir a velocidade desse carro?
DFG: Distância pelo tempoP
Professor: Eu sei, mas você está sentado aqui agora, o que você tem que fazer para medir essa velocidade? Está sentado aqui agora, se eu te digo: DFG, meça a velocidade do automóvel lá embaixo, o que você faz? Você levanta e vai lá fora fazer isso? Sim ou não?
DFG: Sim
Professor: Essa é uma saída?
DFG: É uma saída
Professor: Extremamente óbvia. Qual seria a saída mais óbvia que nós teríamos para fazer isto, ou seja, para você executar um experimento desse de velocidade do automóvel lá fora, você tem que ir lá e fazer o que?
DFG: Observar
Professor: E para esse elétron aí, qual a melhor saída que a gente tem?
DFG: Observar também.
Professor: Observar. Vocês concordam com isso? O que seria ideal pra gente resolver esse dilema e descobrir se afinal de contas o elétron passa por uma fenda ou passa pela outra fenda. Observar esse elétron?
DFG: Sim
Professor: Seria uma boa saída?
"Animação"
Professor: Ou seja, vamos tentar ver afinal de contas por qual fenda realmente o elétron passa, ok?
"Animação"
Professor: A gente coloca um aparelho de medida. O aparelho de medida atua como o que? Como um observador, ok? E aí a gente vai refazer o experimento.
"Animação"
Professor: Ou seja, se o nosso olhão pudesse estar lá, ficava fácil. Olha vem vindo um elétron, vamos ver por onde ele vai passar. Pode ser um, evidentemente não precisa ser um observador como nós, um ser vivo, mas um detector por exemplo, é uma boa medida para se fazer essa observação até porque isso nos permite ver afinal de contas, descobrir afinal de contas, por qual passagem o elétron está indo.
"Animação"
Professor: Alguém entendeu o que ele falou? Quando nós colocamos o observador, o elétron volta a se comportar como se fosse uma partícula e não como um padrão de interferência.
"Animação"
Professor: Ou seja, o simples ato de observar esse elétron, faz com que ele se comporte agora, como uma partícula, não mais mostrando um padrão de interferência.
"Animação"
Professor: Então de alguma forma, vamos trazer aqui um caráter um pouco, vamos chamar assim... animista, pro sistema, porque na realidade a gente sabe que não é assim, ou pelo menos nós tentamos entender o que venha ser, de alguma forma, no momento em que nós colocamos o detector ali, o elétron decide por não mais exibir um

padrão de interferência e agora ele se comporta como uma partícula, apenas a presença do observador ali, ok? Prá finalizar aqui.
"Animação"
Professor: O que o observador tem a ver com tudo isso?
"Animação"
O observador colapsa a função de onda e a distribuição de probabilidades, simplesmente observando, ok?
Termina a animação aqui e quando a gente continua, nós vemos a cena de um filme, um filme que se chama "Quem somos nós", que é um filme que está fazendo bastante sucesso no meio acadêmico e que discute esta coisa do comportamento ali, probabilístico enfim... Talvez seja um filme interessante prá vocês assistirem. Bom, querem ver alguma das duas animações de novo?
Aluno: Quer dizer que se colocar um observador ela vai formar só duas bandas, não vai formar interferência.
Professor: Se você tirar o observador
DFC: [...] todos tipos de observador...
DFC: Todos tipos de observador?
Professor: Nós vamos ver como é possível, agora vamos propor um experimento de observação efetivamente, vamos tentar resolver esse problema aí. Pra isso eu convido vocês pra gente examinar um texto, o terceiro trecho do texto do Feynman que a gente vai lidar agora, porque essas coisas todas são discutidas.
Então hoje o texto começa, já diretamente no experimento com elétrons que vocês já fizeram as representações, nós já vimos aqui as animações, já vimos o experimento real, que afinal de contas ele já foi conduzido na Hitachi. Então vamos lá, um experimento com elétrons.
Texto (leitura)

Imaginemos agora um experimento similar a aqueles já abordados, mas agora com elétrons, como mostrado esquematicamente na figura 1.3. A fonte de elétrons é constituída por um filamento de tungstênio aquecido pela passagem de uma corrente elétrica. O filamento é envolvido por uma caixa metálica, com uma abertura frontal ao arranjo das fendas, aplicando-se um potencial positivo na caixa, elétrons serão emitidos pelo filamento e alguns deles escaparão pela abertura alcançando o arranjo das fendas. Do mesmo modo que nas situações anteriores, os elétrons podem alcançar um detector móvel, colocado em um anteparo à direita das fendas. Nesse caso, o detector pode ser uma fotomultiplicadora conectada a um auto-falante. A gente já vai, daqui a pouco, compreender esse arranjo, porque esse auto-falante, essa fotomultiplicadora.
Comentários Professor
Vale comentar que o experimento com elétrons, não foi feito exatamente dessa forma. É aquilo que eu comentei com vocês, houve o experimento da Hitachi, e no entanto, nós não temos duas fendas no experimento da Hitachi, temos um obstáculo, e o que o elétron tem que fazer? Tem que decidir se ele vai passar pela direita ou pela esquerda daquele arranjo experimental. O texto do Feynman, no original em inglês, quando ele foi elaborado, o experimento ainda não tinha sido executado, então nós fizemos uma adaptação ao texto do Feynman levando em conta que agora o experimento já foi executado, ok?
Texto
Estamos lidando com um tipo especial de experimento, chamado experimento antecipatório de pensamento. Parte desses experimentos são conduzidos em nossa imaginação e é possível conhecer os resultados que seriam obtidos desses experimentos, a partir de muitos outros que foram efetivamente executados, em escalas e proporções tais que acabam por exibir os efeitos que serão aqui descritos. Em nosso arranjo experimental, cada elétron que colide com o detector provoca um pequeno ruído, click, que é amplificado e tornado audível pelo auto-falante.
Comentários
Então, ao invés de nós termos um osciloscópio que aparece um ponto em branco, nós vamos identificar o elétron com um clickzinho, um pequeno ruído no alto falante, ok?
Texto
Vale notar que a cada elétron corresponde a um click e que todos os clicks são idênticos não havendo frações menores, por exemplo, meio click. Os clicks também são produzidos de modo mais ou menos errático, de modo que o ruído gerado é mais ou menos similar àquele de um rádio fora de sintonia.
Comentários
Qualquer hora que a gente tenta atravessar de carro o centro da cidade, aquilo parece que vira um detector de ruído pleno, um rádio sempre muito ruim de sintonizar.
Texto
No entanto é possível falar em uma taxa média na qual os clicks são ouvidos, por exemplo, tantos clicks por minuto, em média. Na medida em que o detector é movimentado, a freqüência com que os clicks aparecem é maior ou menor, mas a altura, a sonoridade de cada click é sempre a mesma. Se abaixarmos a temperatura do filamento emissor, a freqüência dos clicks diminui, mas ainda assim, cada click soa da mesma forma.
Comentários

Como a gente fala aqui, o texto fala: abaixada a temperatura do detector, a freqüência dos clicks diminui, o que significa isso?
Aluno: [...] (Tentar entender)(46min 51seg)
Professor: Ficou claro? Ou seja, o abaixamento da temperatura do filamento faz com que menos elétrons sejam emitidos por unidade de tempo, no entanto, o volume do click não diminui. Significa que cada elétron continua chegando como o que?
Aluno: Com a mesma velocidade.
Professor: Como um elétron inteiro. Ficou claro isso? Então não dá para ter meio elétron, nosso sistema não permite detectar meio elétron, uma vez que nós não temos meio click, ok?
Texto
Bem, também podemos notar que se colocássemos dois detectores separados no anteparo, um ou outro clicaria, mas nunca ambos ao mesmo tempo.
Comentários
Essa informação está aí para contar o que?
DJF: Que o elétron não se divide.
Professor: Mais do que isso, para contar que está chegando quantos elétrons por vez?
DFF: Um
Professor: Ficou claro isso?
DFF: Então, e como está indo só um ele não se divide.
Professor: E se ele se dividisse em cada detector nós ouviríamos com que intensidade?
DJA: Meio click
Professor: Isso está previsto? Não, conseqüentemente não tem saída. É lógico que exceto que caso fossem ouvidos os dois clicks num tempo muito próximo nossos ouvidos não poderiam percebê-los como separados, se existir alguma limitação, pode ser o nosso ouvido que não conseguiu separar eles do ponto de vista de resolução auditivo nosso. Bem, concluímos portanto, que de onde quer que cheguem ao anteparo, os elétrons que são os causadores dos clicks, cheguem como unidades inteiras, todos são do mesmo tamanho, ou seja, todos são unidades inteiras, e chegam um a um ao anteparo, cada um causando um click idêntico a qualquer outro. Podemos concluir que os elétrons sempre chegam ao detector como entidades inteiras e unitárias. Tranqüilo aí? De modo similar ao experimento com projéteis, procuremos encontrar experimentalmente a resposta da seguinte pergunta: Qual é a probabilidade relativa de que um elétron chegue ao anteparo em diversas posições x do centro do arranjo? Como visto anteriormente podemos obter tal probabilidade observando a freqüência dos clicks, desde que mantenhamos constante o regime de funcionamento do filamento.
Deixa eu só interromper aqui esse sistema. Qual é a probabilidade, ok? Perdão.
A probabilidade com a qual os elétrons chegam a uma posição X particular é proporcional à freqüência média dos clicks, nessa posição, ok aí? O resultado do experimento é uma curva surpreendente indicada por P_{12} na parte C da figura 1.3. Essa é a forma com que os elétrons se comportam. Então, essa figura mais à direita aí, está claramente exibindo um padrão de que? Conforme visto nas atividades anteriores.
Aluno: [...]
Professor: A DJA falou um padrão de?
DJA: Interferência
Professor: Interferência. Então, a interferência com ondas de elétrons.
Texto
Tratemos de analisar a figura 1.3 para ver se podemos entender o comportamento dos elétrons. A qualquer momento em que vocês tiverem dúvidas ou algum comentário, a gente pára e faz o comentário, ok? Debate, qualquer idéia aqui. Como seria possível ocorrer interferência num experimento com partículas inteiras, isto é, os elétrons que causam os clicks. Se recordarmos o experimento de interferência com ondas, vamos observar que surgem frentes de ondas esféricas simultâneas nas duas fendas, e a interferência ocorre pela sobreposição das ondas vindas das duas fendas. Ora se elétrons atravessam ou uma fenda ou outra fenda não deveria haver interferência, ok? Procuramos imaginar algumas hipóteses para que o efeito da interferência ocorra: Talvez o elétron se fragmente em dois, e uma parte dele passe pela fenda 1 e outra pela fenda 2, uma proposição que já surgiu aqui. Talvez ele passe pela primeira fenda, retorne, e passe pela segunda fenda segundo algum mecanismo desconhecido.
DJA: Professor, mas um elétron pode se dividir?
Professor: Vamos ver o que o texto fala, o que você acha?
DFG: Eu acho que não
Professor: Quais seriam as condições necessárias para que nós tivéssemos um elétron dividido? Digo de modo mais simples, é fácil quebrar um elétron em dois? Precisamente eu não sei dizer, mas talvez precisássemos de que? Talvez dê..., mas do que a gente precisa para quebrar alguma coisa?
DFC: Energia
Professor: Ok, será que a energia desse sistema aqui, é suficiente para que esses elétrons quebrem em dois?

DFG: É... se um átomo se divide, a gente consegue dividir um átomo, um elétron também pode se dividir.
Professor: Pode ser, mas a prioridade pelos nossos conhecimentos até o momento essa possibilidade é muito grande aqui nesse sistema, dentro daquilo que nós estamos estudando aqui?
DFG: Mas é o seguinte: se um elétron pode ser dividido... acho que toda teoria tinha que ser modelada nisso, pois um átomo ele rodando em volta de um núcleo,... um elétron poderia também estar se dividindo, e daria muita coisa eu acho, acho que é muito complicado.
Professor: Aí nós teríamos que entender mais uma coisa, nós não ouvimos meio click nunca, ou seja, depois que ele passa pela fenda ele teria que o que? Se recombinar?
DFC: Se regenerar
Professor: A troco de que? Porque que ele não se divide quando ele vê só uma fenda na frente?
DJA: É porque ele pára... quando alguém está observando ele.
Professor: Continuaria não tendo resposta pra essa questão, vamos ver o que o texto nos diz.
Texto
Então, consideramos então, que a primeira hipótese acima é inviável, pois não há energia disponível para fragmentar elétrons e ainda por cima sempre ouvimos do detector um click inteiro e não meio click decorrente da presença de meio elétron no detector. Portanto a primeira hipótese aqui, está descartada. Pensemos então na segunda hipótese do elétron passar pela primeira fenda e voltar e passar pela segunda. Consideramos então a segunda hipótese, devemos notar na figura 1.3 C que existem alguns pontos de mínimos na curva de interferência, que correspondem à chegada de poucos elétrons mesmo com as duas fendas abertas. Então vamos dar uma olhadinha na figura 1.3 C, coloquem ela, se vocês preferirem o texto na posição vertical, fica até mais fácil de avaliar, e vamos observar os pontos de mínimo na curva de interferência. Esses pontos de mínimo na curva de interferência, estão indicando que estão chegando poucos elétrons no detector, ok? Por exemplo, o detectorzinho que está colocado lá embaixo, percebam que ele está muito bem alinhado com essa posição de mínimo, vocês estão percebendo? Se a gente traçar uma linha vertical agora desse ponto de mínimo, ela passa pelo detector, portanto nessa figura o detector está colocado num desses pontos de mínimo. Tá e daí? Então, isso corresponde à chegada de poucos elétrons mesmo com as duas fendas abertas, porque essa figura 1.3 C, ela se forma quando as duas fendas estão abertas, ficou claro essa discussão? Nesses pontos curiosamente chegam mais elétrons quando uma das fendas está fechada, isto é, fechando uma das fendas, aumentamos o número de elétrons provenientes da outra fenda.
Comentários
Vocês entenderam a discussão? Então voltem para a figura lá. Então figura 1.3 C, duas fendas abertas, poucos elétrons nessa posição em que está o detector. Fecha uma fenda, que curva que a gente registra? A curva P_1, com mais elétrons naquele ponto. Caramba! Eu fecho a fenda e tem mais elétrons naquele ponto, como é que pode isso? Vão acumulando informação aí, vamos refletir, vamos fuçar nisso aqui à vontade.
Texto
Então, fechando uma das fendas, aumentamos o número de elétrons proveniente da outra fenda, repare que os mínimos da curva P_{12} desaparecem quando uma das fendas é fechada, o que nós acabamos de discutir aqui. Consideremos no entanto, a região central de incidência de elétrons, a figura 1.3 C mostra que P_{12} é mais que o dobro de P_1+P_2, o que significa dizer que nesse ponto fechando uma das fendas diminuímos o número de elétrons proveniente da outra fenda. Então, o que o texto está nós contando aqui é o seguinte: Vamos voltar agora para aquele pico central da figura 1.3 C. Esse pico central ele é mais alto do que a soma da intensidade das curvas quando elas se cruzam aqui nessa figura intermediária. Resultado, quando fecha uma das fendas diminui o número de elétrons desse ponto e quando abre uma das fendas, o número de elétrons nesse ponto é até maior que a soma P_1+P_2, é como se neste ponto chegasse mais elétrons efetivamente, do que estão passando pelas duas fendas.
Compreenderam a idéia que o Feynman está trazendo aqui?

Como resolver esse paradoxo? Para alguns pontos eu fecho uma fenda aumenta o número de elétrons, para outros pontos eu fecho a fenda e diminui o número de elétrons, perdão, para alguns pontos eu fecho a fenda aumenta o número de elétrons para outros pontos, para outro com as duas fendas abertas tem mais elétrons do que passaria efetivamente pelas duas fendas. Então, como lidar com esse paradoxo. A tarefa não é simples e muitas idéias têm sido tentadas para explicar a formação das curvas P_1 e P_2, em termos de partículas individuais, sem que nenhuma delas tenham alcançado sucesso, ok?

Bom e nós aqui vamos tentar resolver o problema que os físicos não tem resolvido, fazer o que? Eles não foram apazes, a gente vai ser. (Risos)

Texto
No entanto a matemática necessária para relacionar P_1 e P_2 com P_{12}, é surpreendentemente simples, a curva P_{12} é similar àquela do experimento com ondas, que é a curva I_{12}, uma curva de intensidade. A explicação no caso das

ondas foi simples, pois se baseou num movimento ondulatório e na possibilidade da variação contínua das intensidades. *Lembram desse dado?* Nós estávamos lidando com uma continuidade e não com uma corpuscularidade. Agora a gente está diante de uma corpuscularidade...
Bom, o que ocorre no anteparo, pode ser descrito em termos de dois números complexos Fi_1 e Fi_2, que são função de X. O valor absoluto de Fi_1 descreve somente quando a fenda 1 está aberta, isto é, a probabilidade de P_1 é o quadrado do módulo de Fi_1, enquanto que somente com a fenda 2 aberta temos P_2 igual ao quadrado do módulo de Fi_2, o efeito combinado das duas fendas será P_{12} igual ao quadrado de Fi_1+Fi_2 exatamente como ocorre para fenômenos ondulatórios.

[...]

Professor: Vê na base da câmera aqui oh.
Parte 2

Essa frase está em Itálico, ou seja, quando nós colocamos a lâmpada lá, nós esperávamos que eles fizessem o que? Atravessassem o arranjo experimental ou pela fenda 1 ou pela fenda 2, não seja por isso, eles fizeram exatamente o que a gente pediu, atravessaram ou pela fenda 1 ou pela fenda 2

Aluno: [...]
Professor: Ok?
Texto
Independentemente se uma das fendas estiver fechada, os elétrons que nós identificamos vindos pela fenda 1 se distribuem, curva P_1', do mesmo modo que estando a fenda 2 aberta ou fechada.
Agora vamos parar aí. Por quê? Porque veja: quando a gente registra a chegada dos elétrons estando as duas fendas abertas, o resultado que nós obtivemos, obtemos, é o mesmo que nós obtemos quando cada uma das fendas está independentemente fechada, só que nós não fechamos fenda nenhuma, nós apenas colocamos uma lâmpada. Perceberam o ponto chave aí? Eles se comportam como se tivesse só uma fenda aberta e no entanto, as duas estão.
Aluno: Mas tem algum observador aí.
Professor: A lâmpada.
DFC: Mas ela não está emitindo os elétrons.
Professor: Não, a lâmpada está emitindo luz que colide com os elétrons, tá.
DFG: [...]
Professor: Como?
Aluno: [...]
Professor: Eles não estão passando só por uma, estão passando pelas duas. Nós fizemos uma tabela, vamos reproduzir, vamos voltar para o experimento. Nós fizemos uma tabela, como é que foi feita essa tabela? Tem lá fenda 1 e fenda 2. Quando a gente vê o flash de luz vindo próximo da fenda 1 a gente assinala um x na coluna da fenda 1, quando a gente observa um flash vindo da fenda 2, nós assinalamos um flash na fenda 2, aí nós temos um monte de elétrons, que foram observados como tendo passados pela fenda 1 e na outra coluna como sendo passado pela fenda 2. Quando a gente faz um gráfico dessas probabilidades, a curva obtida ou as curvas obtidas são as curvas P' 1 e 2, agora essas curvas obtidas P' 1 e 2 não são idênticas àquelas curvas quando nós fechamos uma das fendas e deixamos passar o elétron por uma, fechamos a outra e deixamos passar pela segunda?
DFG: Aí no caso, acho que o observador está causando uma interferência nos elétrons antes de passar naquela fenda, porque para ele destruir...
Professor: Ele está depois da fenda
DFG: Logo depois, juntinho?
Professor: É uma boa possibilidade, o que o DFG levantou, o que vocês acham, de alguma forma o que está acontecendo, o observador está fazendo o que?
DFG: Está interagindo com os elétrons, ele está destruindo, tipo, como eu posso falar..., causando uma interferência no caráter, e modo [...] a destruindo essa.
Professor: De modo a destruir esse caráter ondulatório
DFG: O elétron ele é muito pequeno, qualquer coisinha...
Professor: Ele é muito sutil não é?
DFG: Muito sutil, isso
Professor: O que vocês acham, portanto esse observador pode estar atrapalhando nossa vida, o que vocês acham?
DFC: Olha...
Professor: O que você acha DFC? É uma boa hipótese que eles levantaram. DJA concorda?
Aluno: [...]
Texto

Professor: Concordam, discordam, mais alguma complementação? Então...
Texto
Concluímos que quando observamos os elétrons a distribuição sobre o anteparo é diferente de quando não os observamos. Como explicar um resultado tão inesperado que depende de nossa observação? Talvez seja o fato de nós ligarmos a lâmpada. Pode ser que os elétrons sendo muito pequenos e leves tenham sua trajetória desviada no momento em que espalham a luz, já que o campo elétrico desta exerce força sobre cargas elétricas. Assim não seria surpreendente se o movimento mudasse, de fato, *portanto vocês tem razão dessa argumentação, ok?* De fato, a luz exerce forte influência sobre os elétrons e ao tentar observá-los desviamos sua trajetória, ok? Talvez o desvio poderia de alguma forma destruir o padrão de interferência exibido pelos mesmos, então vejam que vocês estão fazendo uma análise muito sofisticada.

Aluno: [...] a luz fica no centro aqui, ela fica no centro entre as duas fendas não é?
Professor: Sim
DJF: Então qualquer chance que ela tinha de se encontrar na frente à luz não deixa.
Professor: Ainda por cima vai encontrar a lâmpada
DJF: É
Professor: [...]
DFC: É luz, e a luz não deixa...
Professor: Se a gente puder né, partir de uma justificativa dessa linha aí. Legal muito bem, como contornar essa situação? Uma possibilidade seria diminuir uma intensidade luminosa, as ondas luminosas são mais fracas e devem perturbar menos os movimentos dos elétrons, façam de propósito uma saída para esse problema que ele nos dá, com o qual a gente está se deparando nesse momento. Certamente tornando a luz mais e mais fraca, ela finalmente será fraca o suficiente para não perturbar os elétrons, vamos tentar. A primeira coisa que observamos, é que esses flashes de luz dispersos pelo elétron, à medida que passa não são mais fracos, sempre são flashes de mesma intensidade, ou seja, mesmo diminuindo a intensidade da lâmpada, tornando ela uma lâmpada mais fraca, o brilho emitido ali pelo flash de luz ainda é de mesma intensidade e a única coisa que acontece quando a luz se faz mais fraca é que algumas vezes escutamos um click no detector, mas não vemos nenhum flash. O elétron passa sem ser visto entre aspas não é. O que constatamos é que a luz também atua nesse experimento como os elétrons.

Bem, então vamos ver o que vocês acham dessa colocação que está aqui, num determinado momento se a gente torna a luz mais e mais fraca, ou seja, se a gente diminuir a intensidade da luz, nós não observamos o flash, mas percebemos o click, se percebemos o click, então passou um elétron por ali?
DFG: Passou
Professor: Passou, se passou um elétron ali e a gente não viu o flash, significa que o que não aconteceu entre o elétron e a luz?
Aluno: [...]
Professor: Deve ter passado pela lâmpada
DFC: [...] intensidade você está diminuindo aquela... não é potência, aquele observador não é aquele observador que era antes, você está diminuindo esse... fugiu o que eu ia falar. Por exemplo, uma câmera de alta resolução, e depois você não tem mais uma, ela vira uma câmera normal, entendeu? Você diminuiu essa resolução.
Professor: Vamos analisar como é que se dá a formação desse flash aí.
DFG: [...]
Professor: Fala DFG
DFG: [...]
Professor: Não, agora então você tem condição de debater, porque a gente observa, como é que seria o processo de observação do flash. Como é que vocês podem imaginar o que acontece? Agora vocês podem usar todo o conhecimento que a gente debateu em quântica ao longo do curso.
Aluno: [...]
Professor: De que modo?
DFC: Energia luminosa.
Professor: Fala um pouco mais de energia luminosa
DFC: Fóton
Professor: Ok, o que acontece então para a gente observar, você está admitindo então que esta lâmpada está emitindo o que?
DFC: Fóton
Professor: Fóton, a gente aprendeu que é um qualificativo de que, o que é um fóton?
Aluno: [...]
Professor: O fóton é interpretação da luz como o que? O fóton foi criado no começo do século 20, foi designado a que?

DFC: Seria a menor unidade de um foco de energia.
Professor: Unidade, unidade chama o que? Outro termo que vocês estão usando direto aqui.
DJF: [...] unidade
Professor: Uma unidade, mas usem outro termo um pouco mais quântico vamos dizer assim, um pouco mais físico, é uma o que? De luz, ao invés de uma unidade? Podemos traduzir como o que, como uma?
Fala uma unidade de matéria para mim, porque até o momento a gente trabalhou sendo uma unidade de matéria, indescritível, que difícilmente se divide em dois.
DJF: Elétron
Professor: O elétron, no momento que a gente admite que ele é uma unidade de uma entidade física, que ele não se divide em dois, nós estamos tratando ele como o que? Como uma? Vocês falaram essa palavra várias vezes já hoje. É mais simples do que vocês estão procurando, o elétron é uma o que?
DJF: Partícula
Professor: Ponto final, então o fóton é o que? É uma o que, é uma...
DFG: Partícula
Professor: De que?
DFG: De energia.
Professor: De luz
Aluno: [...]
Professor: Ok, uma partícula nós podemos admitir, o fóton, a relação de fóton, é uma concepção do comportamento da luz como o que?
DFG: Partícula
Professor: Ok, então como é que está acontecendo DFG, essa interação entre essa luz e esse elétron? Dá pra vocês concluírem tudo isso que eu estou comentando aqui?
Aluno: [...]
Professor: Muito bem, e aí, o que acontece, o fato de a gente observar o flash de luz, você pode explicar como.
Aluno: [...]
Professor: E o fóton, já que a gente entende como partícula, ele vinha numa certa trajetória, quando ele colidiu com o elétron, essa trajetória não foi desviada de tal modo que esse flash veio parar aonde agora, esse fóton de luz?
DJF: No detector
Professor: Que é quem?
Aluno: [...]
Professor: Ponto final, Ok? Então, estão percebendo o modelo que no fundo está sendo adotado aqui. Muito bem, í se eu diminuo a intensidade da luz do ponto de vista do tratamento de luz como partícula o que significa diminuir uma intensidade de uma lâmpada?
DMM: Diminuir a quantidade de fótons que é emitido.
Professor: Fala de novo DFC prá gente gravar aqui com todas as palavras o que você tá falando
DFC: Você diminui a quantidade de fótons que é emitido pela lâmpada, automaticamente você diminui o número de choques com os elétrons.
Professor: Conseqüentemente pode acontecer de um fóton, de um elétron chegar num detector e agente ouvir o "click" e não haver o flash?
DFC: Pode
Professor: Perfeitamente
DFG: O professor...
Professor: Diga DFG, o DMM
DMM Não tem um experimento feito... só com fótons? De fótons, é isso? Aqui não foi delimitado nada né?
Professor: Foi.
Aluno: [...]
Professor: Que experimento, você está falando o experimento Compton?
DMM: Eu não sei qual que é o experimento, você coloca acho que [...]
DMM: 2 Feixes de luz
DMM: É
Aluno: Eu não sei, eu já ouvi fala alguma coisa disso, e ele fala que em determinado meio a, não sei, [...]
Professor: Será? Você não tá falando daquele com uma reação [...] determinação do éter no espaço, né?
DFG: Não é...
Professor: Teve um experimento muito importante que foi feito se eu não me engano no final do século XVIII começo do século XIX pra tentar detectar a existência do Éter, ou seja, de algum meio material que discutia se é necessário a existência ou não de um meio material pra propagação de energia eletromagnética e, aí foi feito um experimento que procurava demonstrar, ou procurava demonstrar não, mas procurava perceber se esse fluido existe né, porque na realidade o vácuo corresponde ou não a existência de qualquer tipo de entidade física. Se

existir esse fluido pode ser que não seja detectado fisicamente por nós, então, afirmar que o vácuo existe, ou que o lado existe como suporta o material, isto é, que no vácuo não existe nada material é um debate que pode ser que nós não consigamos ainda detectar essa coisa que pode existir ali no meio interestelar. (...) Vamos dizer assim, não estou falando de matéria agora né? Ou até de uma matéria tão tênua que nós não consigamos detectar. Bom, pra resolver esse problema foi feito um experimento na Inglaterra que é um experimento que traz o uso de um interferômetro (...), o interferômetro de Maxwell [...] e que um feixe de laser se propagava exatamente no sentido de rotação da terra e outro exatamente no sentido perpendicular. Bem, se o éter então existir ele deve provocar um arraste na radiação eletromagnética e aí mudar o padrão de interferência na recombinação dos dois feixes. Não foi detectada... mudança no padrão de interferência. A partir daí admitiu-se a existência efetiva do vácuo ou a não existência de matéria no vácuo vamos dizer assim, que dá suporte , se eu não tive muito enganado , a teoria de Einstein.

Aluno: Mas num experimento que poderia...
Professor. [...] parece então que é um outro experimento...
Aluno: [...]
Professor. Sinceramente eu não sei te dizer. Não me lembro. Seria interessante recuperar o experimento depois, se você tiver interesse.
Aluno: [...]
Professor. Ah entendi [...] por que dois fótons não se chocam...
DFC: A gente tem dois feixes de luz [...] para formar um terceiro
Professor: Eu entendi sua dúvida, eu não sei... como eu não sou estudioso de Mecânica Quântica, pode ser que a Mecânica Quântica... tenha uma resposta. Certamente isso deve ser um experimento de larga importância na Mecânica Quântica... Agora... a gente trabalha com mecânica estatística, então é possível que tenha uma resposta para essa sua pergunta... Certamente deve ter viu DMM.
DMM: Mas também não é o caso [...] de choque de fótons...
DMM: Então..., mas se há o choque [...] a partícula de um elétron com um fóton [...] certamente.
Professor. É uma excelente pergunta que nós vamos poder retomar no final dessa história... É uma excelente pergunta [...] nós temos fóton e elétron
DFG: Nós estávamos falando de choque...
DJA: [...] para partícula é diferente... pode ter outro comportamento...
Professor. [...] vocês estão tratando de perguntas muito boas... Vamos voltar aqui prá nossa [...] Então... eu acho que o DFC nos esclareceu bastante... Ele falou se você diminuir a intensidade da lâmpada deixá-la mais fraca, pode ser que como o número de fótons diminui, o número de fótons emitidos pode ser que [...] efetivamente o elétron passa sem sofrer nenhuma colisão. De fato, pode ser...
Texto
Então, o que constatamos é que a luz também atua nesse experimento como os elétrons. Sabíamos que ela tinha natureza ondulatória, mas agora ela também se comporta como partículas, pois estamos tentando observar a colisão entre os elétrons e partículas de luz. A luz é espalhada como partículas, chamadas de fótons. Conforme diminuímos a intensidade da fonte de luz, nós não diminuímos a intensidade dos fótons. Isto é, eles não ficam mais fracos, mas apenas diminuímos a taxa com que eles são emitidos. Menos fótons são emitidos por unidade de tempo. Isso explica porque quando a intensidade da fonte é diminuída alguns elétrons passam sem serem percebidos. Ocorreu que não haviam fótons por perto quando o elétron passou. Ok? Muito bem. Parece que estamos num beco sem saída. Se de fato, sempre que vemos o elétron, vemos um flash de mesma intensidade, então os elétrons que vemos são sempre os elétrons perturbados, os que não perturbamos nós não vemos.

DFG. Professor... só voltando um pouquinho. Um fóton somente é suficiente [...] o olho derrete?
Professor: Bem, isso é uma questão fisiológica... uma questão fisiológica. Lembra que eu vou te dar uma resposta sobre isso. Mas lembra que nós estamos tratando aqui de um experimento pensado. Nós admitimos essa possibilidade de observarmos um único flash, de um único elétron pela colisão de um único fóton. Acho que isso responde a sua pergunta. De qualquer forma para não te deixar insatisfeito eu antecipo o seguinte: o nosso sistema óptico tem a capacidade de percepção de pelo menos 6 fótons. Que já é uma quantidade extremamente baixa...
DFG. Então no caso a gente não enxergaria esses flashes?
Professor: Portanto, trata-se de um experimento pensado, ok? Mas de qualquer forma, veja: essa lâmpada está emitindo quantidades próximas à quantidade molar de fóton por segundo alguma coisa aí da ordem de 10^{20}/s fótons, talvez. Agora imagine que é um sistema óptico com sensibilidade de 6 fótons. Ou seja, nosso sistema óptico é muito bom.
Bem, a gente só vê a trajetória dos que a gente atrapalha, os que a gente não atrapalha a gente não vê. Então a conclusão de tudo isso. O que acontece?

Continuemos de todo modo a lidar com um experimento de luz fraca. A partir de agora sempre que escutarmos um click no detector, registraremos as observações em três colunas: na coluna 1, os elétrons vistos pela fenda 1, na coluna 2, os elétrons vistos pela fenda 2, isto é que a luz detectou como passando pela fenda 1e passando pela fenda 2. Ok? Em coluna 3, os elétrons que não foram vistos, isto é, nós não percebemos nenhum flash, quer dizer não tem nenhum flash. Quando elaboramos nossos dados e calculamos as probabilidades, encontramos os seguintes resultados: aqueles vistos na fenda 1, têm uma distribuição como P1', aqueles vistos na fenda 2 tem uma distribuição como P2', de modo que os vistos tanto pela fenda 1 como pela fenda 2, têm uma distribuição como P'12, ou seja, a soma de P1'+ P2', ok? E aqueles não vistos têm uma distribuição ambulante(25min 45seg – parte 2), exatamente como P12 da figura 1.3... isto é, se os elétrons não são vistos eles exibem interferência. Então aqueles elétrons que se escaparam do flash mostram padrão de interferência.
Sujeitinho trabalhoso, não é? O que vocês acham disso?
DJF: É o caso [...] que ele prá ser visto ele tem que se chocar com alguma coisa para o detector observar. Nesse caso ele [...] ele destrói toda [...]
Professor: Tá certo, quando você tira o detector se comporta como onda, ele falou. Quando você coloca o detector ele se comporta como partícula. Tudo bem, por enquanto parece que a coisa está meio complicada, mas vamos ver se a gente consegue ganhar alguma coisa mais... aprender alguma coisa mais.
É possível aprender o que ocorreu, quando não vemos o elétron, nenhum fóton o perturba e quando o vemos algum fóton o perturbou. Há sempre a mesma quantidade de perturbação porque o fóton de luz produzem, todos eles, efeitos de mesma intensidade e o efeito dos fótons dispersados e sempre suficiente para borrar qualquer interferência. Ok?
Por enquanto tranqüilo aí né. As argumentações de vocês estão boas.
Existiria alguma maneira pela qual pudéssemos ver os elétrons sem perturbá-los? Aprendemos na disciplina de Quântica que o momento transportado por um quantum é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Lembram dessa expressãozinha. Eu sempre falei para vocês: olha! Isso conecta propriedades ondulatórias com propriedades corpusculares.
Certamente a sacudida dada ao elétron quando o fóton é espalhado aos nossos olhos, depende do momento que o fóton transporta. Assim, se queremos reduzir a perturbação sobre os elétrons temos que diminuir a freqüência ou diminuir o comprimento de onda da luz e não reduzir a sua intensidade. Lembra que nós fizemos esse debate pessoal? Lembram do efeito fotoelétrico? Efeito fotoelétrico é um efeito que depende da freqüência da luz e não da intensidade. É esse problema que agente tem aqui, aparentemente. Nós estamos usando o elétron, fótons de momento muito grande, portanto, comprimento de onda muito pequeno, freqüência muito alta. Se a gente faz isso a gente transfere muito momento para o elétron no evento da colisão. Ok?
Uma possível saída começa ser dada por aqui.
Usemos então uma luz de cor mais vermelha, poderia ser ainda uma luz infravermelha, com ondas de rádio, como radar e ver onde foi o elétron, com a ajuda de algum equipamento que possa ver ondas maiores. Se usarmos luz menos energética talvez possamos evitar perturbar tanto os elétrons. Ok?
Tratemos o experimento com ondas maiores, então. Continuaremos repetindo nosso experimento usando luz de comprimento de onda cada vez maior e portanto, maior energia e menor momento. No começo nada parece mudar, os resultados são os mesmos. Então ocorre uma coisa terrível
Entenderam essa discussão? Então só para repetir.

A gente vai tentar minimizar essa perturbação que a colisão do fóton causa com o elétron. A solução é diminuir o momento do fóton. Diminuir o momento do fóton, significa aumentar o comprimento de onda. De fato a gente vai aumentando o comprimento de onda da luz. Chega num ponto que a gente acaba por não mais perturbar ou incomodar o elétron e a gente consegue observar o padrão de interferência. Só que isto vai acontecer para um comprimento de onda tal que não nos permite mais dizer se o elétron passou pela fenda 1 ou pela fenda 2.

DFG: Então se aumentar o espaço entre as fendas e [...]

Professor: E aí eu não sei onde, afinal de contas eu vejo o flash, mas eu não vejo mais se
ele veio da fenda 1 ou da fenda 2.
DFG: Mas então a distancia interfere na...
Professor: É. É uma questão importante. Mas vocês estão percebendo o problema de observação que acontece aí?
No momento em que a gente está alcançando a condição do tipo: agora eu pego ele. O que que acontece. Eu não sei mais se ele passou pela 1 ou pela 2.
DFG. Ele vai refletir aqui será?
Professor: Eu não sei o que vem pela frente aí. Vamos ver.
DFG: É complicado [...] que eu cheguei

Professor: O problema das fendas, da distância das fendas não é crítico, a gente vai se centrar Principalmente no problema da interferência... da perturbação causada pelo observador.
DFG: É porque se aumentar [...]
Professor: Mas de qualquer forma então para esse caso, vai dar para observar de onde
[...]
DFG: [...] elétron
Professor: Não
DFG: [...] o choque... É fiquei só meio encucado é que [...] como então [...]
Professor: O que interfere? Como interfere? Tudo isso são ótimas perguntas viu DFG, mas, de qualquer forma, dentro do papel do observador, vocês estão conseguindo entender o que acontece ali? Qual é o problema do experimento todo?
Até agora a gente não sabe como resolver a questão do observador, né. Bem...
Texto:
No nosso experimento descobrimos que é impossível se determinar por qual fenda passou o elétron e ao mesmo tempo não perturbar o padrão... usar a luz e não perturbar. Eu só quero enxergar. Eu enxergo, mas eu não perco a interferência. Se eu não enxergar eu ganho a interferência de novo. Ficou claro até aqui?
A partir dessa constatação Heisenberg sugeriu que as novas leis da natureza só poderiam ser consistentes se existisse alguma limitação básica na nossa capacidade experimental, não reconhecida até aquele momento. Ele propôs como princípio geral o Princípio da Incerteza que podemos enunciar em termos desse experimento como segue: É impossível projetar um dispositivo para determinar através de qual fenda passa o elétron que não perturbe ao mesmo tempo os elétrons o suficiente para destruir o padrão de interferência. Compreenderam a elaboração dele? Se o dispositivo é capaz de determinar através de qual fenda vai passar o elétron ele não pode ser tão sutil que não perturbe o padrão de uma maneira essencial. Ninguém jamais encontrou um modo de contornar o princípio da incerteza e assim..., devemos supor que ele descreve uma característica básica... da natureza.
DFG: Fizeram [...] rádio.
Professor: Na realidade... possivelmente fizeram. Eu não sei te responder essa pergunta, mas você está levantando questões muito boas. Não é? Será que aí o elétron vai ter a intensidade ou a transferência de momento. Na realidade, o que acontece aqui também é o seguinte DFG, a [...] tem que ter uma relação razoável entre o comprimento de onda e a distância entre as fendas. Se você usar ondas de rádio, você sai um pouco fora dessa escala, aí você não determina nada, justamente porque agora você começa a ter onda de rádio, de muito baixa energia. Possivelmente os elétrons não são interferidos ou se são interferidos por ondas de rádio, não o são suficientemente para que se possa fazer essa determinação. Exatamente. Eu tenho que pensar um pouco mais... para responder essa questão.
Bem, a teoria completa da Mecânica Quântica que até agora usamos para estudar os átomos e de fato, toda matéria, depende da qualidade desse princípio. Sendo a Mecânica Quântica uma teoria de tanto êxito, a confiança no princípio da incerteza é reforçada, mas se uma forma de superar o princípio da incerteza for um dia descoberta, a mecânica quântica dará resultados incompatíveis e terá que ser descartada como uma teoria válida da natureza. Afinal, o que se passa com a proposição A? É verdade ou não é verdade que cada elétron passa, seja pela fenda 1, seja pela fenda 2? Nós não resolvemos essa proposição ainda. A única resposta que pode ser dada a essa questão é que descobrimos que devemos pensar no experimento de modo diferenciado para não cairmos em contradição. O que se deve dizer para evitar previsões erradas é o seguinte: Se observarmos as fendas, ou mais precisamente se temos um artefato capaz de determinar se os elétrons passam através da fenda 1 ou da fenda 2, então podemos dizer que de fato eles vêm das fendas 1 ou 2. No entanto, quando não tentamos observar de onde vêm os elétrons, isto é quando não há um experimento, um artefato que perturbe os elétrons, então, não podemos afirmar que eles passam ou através da fenda 1 ou através da fenda 2. É sobre essa corda bamba que devemos caminhar se queremos escrever com êxito, se desejarmos descrever com êxito a natureza. Ou seja, se nós não observamos, nós não podemos afirmar. E por que que nós não podemos afirmar? Por que existe interferência, mesmo passando um elétron por vez. Ficou claro isso? Se passa um elétron por vez e há interferência, então, se eu admito que passa pela fenda 1 e pela fenda 2, então eu não poderia admitir essa interferência. No entanto, o resultado experimental mostra isso, ok? Perceberam o dilema que o físico mecânico quântico vive?

O experimento mostra afinal, que o movimento de toda a matéria, assim como dos elétrons deve ser descrito em termos de ondas. Como fica então o movimento dos projéteis no primeiro experimento? Por que não vemos ali um padrão de interferência? Isso voltando para aquele primeiro experimento com a metralhadora, tá? Tá, os projéteis os comprimentos de onda são tão minúsculo que o padrão de interferência torna-se muito estreito. Tão estreitos que qualquer detector por menor que seja não pode distinguir os máximos e mínimos separados. O que observamos é apenas o valor médio que é a curva clássica de dispersão. Na figura 1.5 indicamos esquematicamente o que acontece com objetos macroscópicos [...] da figura mostra a distribuição de probabilidades para projéteis usando a mecânica quântica. Ok?

As rápidas oscilações representam o padrão de interferência que se obtém para as ondas de comprimento de onda muito curto. Qualquer detector físico não acompanharia as rápidas oscilações da curva de probabilidades, de maneira que as rápidas oscilações mostram as curvas suaves desenhadas na parte B da figura. Então na realidade o que os nossos equipamentos de detecção na atualidade mostram é a média dessa espécie de curva [...] muito curtas aí. No fundo [...]
Então vamos avançar um pouco mais no texto...

Primeiros Princípios da Mecânica Quântica
Vamos agora a um resumo das principais conclusões obtidas dos principais experimentos. Apresentamos os resultados de modo que eles sejam vistos... Se definirmos um experimento ideal como aquele livre de influências externas ou que pelo menos tenhamos controle de todas as variáveis, de modo geral podemos afirmar que um experimento ideal é aquele em que todas as condições iniciais e finais estão completamente especificadas. Chamaremos de evento o conjunto inicial e final de condições, como por exemplo, um elétron abandona o filamento, alcança o detector e nada mais acontece. Vejamos agora nosso resumo:

Resumo
(1) A probabilidade de ocorrer um evento de um experimento ideal é dada pelo quadrado do valor de um número absoluto de um número complexo fi que é chamado de amplitude de probabilidade. Onde:
P = probabilidade,
□ = probabilidade de amplitude,
P = | □□ ^{2} |
Então a probabilidade é dada

(2) Quando um evento pode ocorrer de diversas maneiras alternativas, a amplitude de probabilidade para o evento é a soma das amplitudes de probabilidades para cada maneira considerada, separadamente. Ocorre interferência: Então existem dois modos alternativos desse elétron atravessar aquela barreira, porque existem duas fendas. Então, nesse caso... para cada maneira [...] e ocorre interferência. O que é fi? É a soma dessas duas probabilidades, portanto

□□□□ = □□$_1$ + □□$_2$
P = | □□$_1$ + □□$_2$ |^2

(3) Se um experimento é executado de tal forma que seja capaz de determinar se uma ou outra alternativa é a que realmente ocorre, então a probabilidade de ocorrência do evento é a soma das probabilidades de cada alternativa e a interferência é perdida. Dito de outra forma, se... nós temos duas fendas abertas, então o elétron tem duas alternativas para atravessar o arranjo experimental, ou pela fenda 1 ou pela fenda 2 e ponto final. Consequentemente, a probabilidade de localizá-lo vai ser o quadrado da soma das amplitudes individuais. No entanto, se eu agora tento detectar qual vai ser a alternativa escolhida, a probabilidade simplesmente vai ser a soma da probabilidade de cada uma... Ficou claro isso?

A proposição 3 acima, claramente vai indicar que é o comportamento... corpuscular dos elétrons. Resultado, esse comportamento vai ser determinado pelo experimento que nós [...] É o que o nosso amigo tio quântico fala. O elétron, a partir do momento que ele vê o observador ele se define (eu não vou mais [...] que isto daqui está sendo uma animaçãozinha). Você não vê o observador, mas ele faz, numa concepção animista que a gente tem que tomar cuidado. Ele faz uma escolha a de não se comportar mais como onda porque tem um observador. Como explicar isso? É o caso de se perguntar: Como isso pode ocorrer? O que está por trás dessa correlação experimento *versus* resultados? Não há respostas para essas questões... alcançar princípios básicos mais

fundamentais que nos permitam deduzir esses resultados. Ou seja, não dá prá gente ir mais fundo [...] nós fomos nessa conversa aqui hoje. Ok?

Vamos enfatizar uma diferença bastante importante entre mecânica clássica e mecânica quântica. Discutimos as probabilidades de como os elétrons se comportam numa dada circunstância. Vimos que com nosso dispositivo experimental ou qualquer outro... é impossível de se prever exatamente o que vai suceder. Dito de outra forma, a física tem desistido de prever o que vai acontecer exatamente numa dada circunstância. A física desistiu. Não podemos prever com certeza. O máximo que podemos é estabelecer a probabilidade de ocorrência... Não dá prá saber efetivamente o que acontece. Deve-se reconhecer que isto é uma diminuição em nosso ideal de compreender a natureza. Pode ser um passo para trás, mas não se encontrou ainda nenhuma forma de se evitar. Só temos, no entanto, uma última tentativa para resolver a situação... Talvez o elétron tenha algum tipo de capacidade interna (algumas variáveis internas – que não conhecemos ainda... que não podemos predizer o que vai acontecer). Talvez se pudéssemos observar mais de perto o elétron, talvez fôssemos capazes de dizer onde ele iria parar. Até onde sabemos isso é impossível e ainda assim teríamos dificuldades. Suponhamos que no interior do elétron haja certo tipo de mecanismo que determine onde ele irá parar. Esse mecanismo dirá também através de qual fenda ele passará, em sua trajetória. Mas não devemos nos esquecer que o que está dentro do elétron não vai depender de nós em particular.

Deixe-me dar uma interrompida aí. Vocês entenderam a idéia? Nem que o elétron fosse capaz de fazer essa escolha, né? Como é que ele sabe do problema do observador? Como é que ele faz a escolha dele na presença ou na ausência do observador. Bem, dessa forma, e ele tem que adivinhar né? Que horas que a gente vai fechar a fenda [...]

DFG: [...] uma interferência física... para abrir uma fenda ou outra, ele não está interferindo em nada, não é?

Professor. Ele não pode prever que eu vou abrir uma fenda num determinado momento.

DFG: ... Pensa o elétron...

Professor Como é que ele pensando nisso, então vejam que particulazinha encrencada, né?

Professor: Bem, dessa forma, se o elétron antes de abandonar o filamento já se decidiu qual fenda irá usar e em que posição do anteparo irá parar. Encontraríamos: P_1 para os elétrons que escolheram a fenda 1, P_2 para os que escolheram a fenda 2, e necessariamente a soma $P_1 + P_2$ para a condição de duas fendas abertas. Parece não haver alternativas além destas. Experimentalmente verificamos que este não é o caso. Não vislumbramos uma saída para esse mistério, de maneira que até o momento temos que nos contentar em calcular probabilidades. Dizemos até o momento, mas há fortes suspeitas de que esta situação é algo que estará conosco para sempre. Que é impossível resolver esse mistério. Que é assim que a natureza é.

Então vejam o dilema do físico, um sujeito que tem que lidar com a mecânica quântica. Bem, vamos para o item 1.8 que é o Princípio da Incerteza.

Princípio da Incerteza

Inicialmente Heisenberg enunciou o princípio da incerteza da seguinte forma: se medirmos a natureza e determinarmos a componente na direção x de seu momento com uma incerteza Δp, não podemos, ao mesmo tempo conhecer sua posição x em forma mais precisa que $\Delta x = h/\Delta p$, na qual h é uma constante natural chamada Constante de Planck e é aproximadamente 6,62 X 10^{-34} joule. Segundo.

As incertezas na posição e momento do objeto, por exemplo, partícula em qualquer instante deve ter seu produto maior que a constante de Planck. Este é um caso especial do princípio da incerteza, que foi enunciado anteriormente com mais generalidade. O enunciado mais geral foi que, de nenhum modo pode-se desenhar um equipamento que determine qual das duas alternativas deve ser tomada, sem que ao mesmo tempo se destrua o diagrama de interferência.

Aquilo que nós tínhamos visto anteriormente, primeiro enunciado. Ok?

Demonstraremos, para um caso particular, que o tipo de relação dada por Heisenberg deve ser verdadeira. Nós vamos tentar salvar... o experimento ainda, tá. O Feynman... não se deu por vencido e nós vamos tentar salvar o experimento.

Imaginemos uma modificação no experimento da Fig. 1-3 a qual a parede com as fendas consiste em uma lâmina montada sobre rodas de modo que possa mover-se livremente para cima e para baixo (na direção x) como mostrado na Fig. 1-6. Observem que as fendas têm uns roletezinhos nas [...] Vamos supor que ela possa subir e descer ao longo da direção x... Observando cuidadosamente o movimento da lâmina, podemos imaginar através de qual fenda passa o elétron. Imaginemos o que acontece quando o detector está colocado em $x = 0$, ali no centro do arranjo... parede lateral... Estão vendo... A lâmina deve retroceder com igual momento na direção oposta. Entenderam a idéia? A lâmina sofrerá um leve deslocamento para cima. De modo similar, se os elétrons atravessarem a fenda 2 e colidirem, a lâmina deverá se movimentar levemente para baixo. Então para cada posição do detector a direção... dependerá de o elétron ter passado pela fenda 1 ou pela fenda 2. Assim, sem perturbar de nenhuma forma os elétrons mas apenas pela observação da lâmina podemos dizer por qual fenda passou o elétron.

O que vocês acham? Dá esperança?

DFG: É meio complicado fazer isso, não é?

Professor. Mas você percebeu, lembra que é um experimento de pensamento

DFG: ... É pensado, mas...

Professor. Fisicamente é outra história.

DFG: Pra comprovar ele

Professor: Como é que a gente vai, fisicamente é uma outra historia. Mas de qualquer forma, a pergunta que eu faço para os outros é a seguinte:

Professor. Tá bolado aqui um sistema de detecção de elétrons que passa pela fenda 1 ou pela fenda 2 sem colocar agora a interferência de uma lâmpada?... Em tese.

Aluno: Em tese sim...

Professor: Entao vamos ver o que acontece aqui no sistema, já que nós não fizemos nada a não ser colocar uma lampadazinha(49min 53seg parte 2) la na fenda... de preferência com esse canhao de elétrons desligado, para que esses elétrons não fiquem vendo a gente fazer os aparafusamentos necessários ali, né. [...] E ainda por cima esconde as rodinhas...

Professor. No caso aí.

Professor: Bem para fazer este experimento, é necessário saber qual o momento da lâmina antes de ela ser atravessada pelo elétron, de modo que quando medirmos seu momento depois de passado o elétron podemos calcular o quanto ele mudou. No entanto, de acordo com o princípio da incerteza, não podemos conhecer a posição da lamina por decisão arbitrária, mas se não sabemos exatamente onde está a lamina, não podemos dizer com que precisão, onde estão as duas fendas. Elas estarão em um lugar diferente para cada elétron que a atravessa, com essa deslocalização das fendas o centro da figura de interferência estava numa posição diferente para cada elétron.
DFC: É porque tipo [...] se o elétron bate nessa parede [...]

Professor: Ela sobe, o centro já é outro.

DFC: Já é outro
DFC: [...]
DFC: É
Professor: Mas eles estarem em lugares diferentes para cada elétron que atravessa, com essa deslocalização das fendas, o centro da figura de interferência está numa posição diferente para cada elétron. As oscilações da figura de interferência se tornarão mais e mais difusas acabando por destruir seu padrão e não mais poderemos observá-las, ok? Heisenberg reconheceu que se fosse possível medir o momento e a posição de uma partícula de modo simultâneo com maior precisão, a mecânica quântica estaria sob risco, ele propôs então que uma busca por uma maior precisão é impossível, de modo que o princípio da incerteza acaba por proteger a mecânica quântica de um possível colapso. A todo tempo tentamos desafiar esse limite medindo elétrons, átomos, bolas de bilhar e outros objetos até agora sem sucesso. A mecânica quântica mantém as funções arriscadas, mas inabaláveis...
Aluno: [...]
Professor: Então, o que vocês acharam da coisa? Por enquanto o que vocês acharam da física descrita desses processos físicos que foram debatidos aí. Quem quiser concordar ou discordar fiquem à vontade, porque agora nós vamos começar um debate um pouquinho diferente aqui.
Aluno: É nos experimentos pensados [...] botar eles em prática, eu acho que alguns deles aqui é meio inviável.
Professor: Essa coisa é importante, o resto acha... o que acha? Alguém quer falar alguma coisa?
luno: [...]
Professor: Então, na realidade eu diria pra vocês o seguinte: que nem sempre é necessário que a gente faça o experimento pensado, porque, o experimento pensado, a finalidade dele não é necessariamente encontrar uma resposta, é fazer o que nós fizemos aqui, é refletir sobre a situação física do sistema e a partir dessa reflexão a gente consolidar os nossos conhecimentos. Por exemplo, quando a gente... vamos voltar naquele experimento pensado que eu discuti com a mosquinha pousada num prato da balança analítica e um copo invertido sobre ela, o sistema [...] uma determinada massa, quando a mosquinha começa a voar, o que acontece com a massa da mosquinha? [...] com a indicação de massa da balança é importante saber a resposta desse experimento? Não, mas esse experimento serve pra que, fundamentalmente então? Pra gente discutir os conhecimentos que vocês têm de física, de estática e dinâmica ali, mas espera um pouco. A mosquinha tem num certo peso, a força peso ali, que aponta pra baixo, se ela está no ar isso faz alguma diferença de ela estar encostada na balança ou não? De qualquer forma ela está dentro do arranjo.
Aluno: [...]
Professor: Então vocês estão percebendo, é importante ou não no resultado da balança o fato da mosquinha estar voando ou estar pousadinha? Vai fazer diferença ou não? Para dar uma resposta se vai fazer diferença ou não, você tem que colocar em discussão todo o conhecimento de física que vocês têm, pelo menos nesse assunto. E aquilo, a finalidade do experimento de pensamento que foi, foram executados aqui, eles não foram em momento algum chegar em uma resposta, mas consolidar conhecimento que eventualmente vocês tinham, e trazer pra vocês o grande mistério da física quântica que a gente não consegue resolver. Então nós não temos o resultado, ou até temos, como a Hitashi conseguiu, mas ele não perdeu a sua validade, o resultado resolveu o problema do comportamento do elétron. Continuou sem resolver o problema de como esse elétron se comporta.
DMM: É que as vezes os experimentos pensados, na prática não é [...] pensava-se que o elétron ia se comportar como partícula, no caso [...]
Professor: Na realidade não, na realidade o experimento muito provavelmente, olha..., essa sua afirmação DFG, ela é interessante na medida que a gente pensa no seguinte: esse experimento pensado ele foi bolado por alguma razão, ele não foi bolado à toa, prá que alguém bolou esse experimento? Para que serve esse experimento pensado?
DJA: Para provar que [...] se comporta como partícula [...]
Professor: Então já se tinha antecipadamente a possibilidade de que o comportamento dele fosse estranho, você está entendendo o que eu estou querendo te dizer? Então, esse experimento não foi criado para descobrir se o

elétron tem comportamento de partícula onda ou não, previu-se essa possibilidade criou-se esse experimento pensado, justamente para que a gente debatesse as conseqüências da aceitação dessa hipótese do comportamento da partícula onda.
Aluno: [...] o cientista pensa [...] algum [...]
Professor: Na realidade, essa resposta é uma resposta que eu não sei te dar diretamente, mas muito provavelmente ela está vinculada ao próprio princípio da incerteza e a hipótese de Einstein, de que a luz tem comportamento corpuscular e Einstein prá explicar o efeito fotoelétrico admitiu essa hipótese, vocês lembram disso? Até então a luz era uma entidade física que todo mundo entendia como sendo o que? Uma onda. No entanto, o efeito fotoelétrico só foi explicado, admitindo essa hipótese de que a luz também se comporta como o que? Como partícula, e que aquele arranjo experimental do fotoelétrico, o comportamento dela é comportamento de partícula, ok? Bacana, [...] então uma hora a luz, dependendo do experimento quando ela atravessa a fenda e exibe interferência difração... ela está exibindo comportamento ondulatório, quando ela colide com a placa metálica no vácuo lá... e manifesta efeito fotoelétrico, ela está se comportando como partícula, ok?
DFC: [...] Einstein [...]
Professor: Sim. Bom, porque não admitir simetria na natureza e admitir que as partículas da natureza também não podem se comportar como onda, ponto final. Você fecha a conversa que está inaugurando agora [...] bom se a luz pode [...] que a gente entende até hoje como uma onda, forma uma partícula, será que aquilo que a gente aprendeu como partícula também não se comporta como onda? Aí vem a hipótese de Broglie..., e por aí vai... Então veja, na realidade se a gente quisesse fazer uma descrição da natureza e o texto fala em determinado momento disso, rigorosamente, se a gente for fundo no experimento, nós temos rigorosamente partículas de um lado e onda do outro? Não, nós temos o tempo todo entidades físicas que podemos classificar como o que? Partículas onda. Agora em função do experimento que nós fazemos elas vão manifestar comportamento ora de partícula ora de onda, não foi isso que o experimento pensado mostrou? Sim ou não? Nesse sentido eu pergunto para vocês, agora pouco teve a seguinte discussão:... Professor não tem aquele feixe de fótons que se cruzam e aí vai colidir ou não vai colidir? Aí veio [...] acho que o DFG falou: ah! mas espera um pouco, aí no caso do feixe de luz todas as entidade são o que? Vocês classificaram o feixe de luz, todas as entidades são fótons, e aqui nós estávamos discutindo... de fóton e elétron, não é isso? Mas afinal existe diferenciação entre fóton e elétron? Fóton também não se comporta ora como partícula ora como onda? Elétron não se comporta ora como partícula ora como onda, então qual é a diferença?
DJF: Carga
Professor: Ok, fóton tem carga, e elétron não tem carga, mas existe partículas que também não tem carga, nêutrons por exemplo.
Aluno: Na hora do choque pode ser diferente.
Professor: É um fato isso, mas você percebe como as coisas começam a perder contraste [...] partícula onda [...] compreenderam a idéia? Bem, então nós temos afinal de contas, se eu der a vocês agora novamente esses esquemas de figuras que vocês representaram aí, um sistema com duas fendas e elétrons a partir dessa discussão toda, agora vocês teriam como fazer uma representação diferente com alguma representação do que acontece com esses elétrons, um só que atravessa as duas fendas. Tem uma representação física, dá pra fazer DMM
DJF: [...] na parede [...] resultado sim [...]
Professor: [...] no resultado como ela passa, dá pra fazer essa representação? E agora, como que a gente faz então, que a gente quer representar essas partículas..., alguém tem alguma sugestão?
Aluno: [...]
Professor: Que recurso que nós temos então pra escrever o evento da natureza, que é o elétron atravessando a fenda? Que tipo de recurso que nós temos, nós temos algum recurso? O recurso do experimento aí, mesmo que seja o experimento pensado de representar no papel, funciona permite essa coisa? Que recurso que nós temos então? Como cientistas, qual é o único ponto que nós podemos nos apegar para tentar fazer uma definição do que está acontecendo?
DJF: [...] sei lá...
Professor: Não, nós temos um recurso.
Aluno: [...]
Professor: Não... fisicamente está acontecendo... é daí que nós conseguimos descrevê-los. Se nós não conseguimos descrever fisicamente será que tem alguma outra maneira de descrever? Qual seria a outra maneira? Que descrição nós podemos dar para o experimento? Se é que tem uma descrição... O texto fala de uma descrição, e não é uma descrição física, que descrição seria? Descrição física é descrever fisicamente o sistema, o evento. Isso aqui é uma barreira, isso aqui é um elétron... Se nós não temos uma representação física prá que tipo de representação nós temos que apelar? Sei lá..., simbologia
Aluno: [...]
Professor: Não, também não
Aluno: [...]

Professor: A gente pode fazer descrição. Na hora da prova, qual é a saída para descrever esse sistema? Que recurso que nós temos para descrever isso se não há uma representação física, nós temos uma descrição o que?
DMM: Matemática
Professor: Ponto final, qual é a única maneira de nós fazermos a representação do evento, DFG?
DFG: Matemática
Professor: Ponto final, então o que é que nós precisamos prá descrever eventos quânticos subatômicos, que instrumento que nós precisamos, que ferramenta que nós precisamos?
DFG: Matemática
Professor. Então, chega num determinado momento do curso de mecânica quântica que dá prá eu falar de representação física do elétron? Eu tenho que apelar prá quê? Nós temos que apelar prá que? Para as funções matemáticas, para equações matemáticas. Vocês estão vendo a necessidade de a gente contar com a matemática? Vocês não têm uma descrição física. Eu tenho que falar em probabilidade, em probabilidade matemática... Eu já não consigo desenhar este átomo, eu não tenho o comportamento físico dele. Eu posso no máximo representar uma função de onda e resolver uma equação matemática que estabelece o que? Probabilidade de localização, como para o sistema físico... probabilidade de localização da matéria.
DMM: A matemariaca é bem simples para um problema tão complicado.
Professor: A matemática é muito simples e o problema muito complicado. A matemática é simples. Então qual é nossa única saída. Não é Filosofia, nem Religião... é a descrição, o que? Matemática.
Aluna: Inaudível... (Completar)(01hr 04min 22seg – parte 2)
Professor. Reza na hora, ok? Então, nesse sentido, ficou claro para vocês a necessidade de a gente num determinado momento apelar para uma descrição matemática... É essa [...] esse paradoxo, esse beco sem saída que nos obriga a partir para uma definição matemática e não somos nós que estamos impossibilitados de resolver o problema do experimento... não..., é a comunidade científica que não consegue. E o único e mais importante instrumento que temos até hoje é aquele que apela para a matemática e não para a [...] Então..., este experimento da dupla fenda, ele tem representação matemática. Todo ele... tem representação matemática. Existem computadores que fazem representação matemática. A maneira como a gente pode representar matematicamente, com o elétron se deslocando numa determinada direção, entrando no sistema de duas fendas e gerando um padrão de interferência [...] existe essa representação matemática. Eu estou até com vontade... será que eu dou uma interrompida e mostro essa representação matemática para eles? Ou com os [...] aos que gostaram do trabalho, naturalmente... os que tiverem interesse em... dar uma olhadinha nessa abordagem matemática, por que... avançando mais ainda, nós queremos... à caça de pessoas que estão querendo entender como é essa abordagem matemática, de que forma essa abordagem matemática pode até melhorar a percepção do estudante de terceiro grau, do estudante de mecânica quântica, em cima desse problema. Por isso que a gente está convidando tanto quantos forem necessários para fazer esse tipo de debate. Porque nós estamos à caça de talentos para lidar com esse problema... de pessoas que gostam. Não é muito profundo o que vai ser abordado, inclusive é uma matemática que eu abordei em sala de aula. Não tem nada mais sofisticado do que aquilo que foi estudado por vocês... né, mas que tem uma representação visual do que acontece... uma representação visual, não o sistema físico, mas da elaboração matemática. Como é que a gente visualiza a representação matemática de um létron, de um único elétron... penetrar num sistema de duas fendas e exibir interferência. Aqueles que podem... está à disposição. Nós esperamos que vocês tenham interesse. Ok? Tranquilo pessoal? NMMvocê quer falar mais alguma coisa...

Professor. E não [...] aquilo que [...] a NMMquer falar de um questionário, onde ela pergunta prá vocês, o que vocês acharam da atividade. É um questionário que vocês não devem se identificar... nem RA nem nada, justamente porque vocês têm absoluta liberdade para criticar a atividade aqui... o professor, a atividade, a figura... à vontade. E vocês podem passar na minha sala e pegar esse questionário, amanhã. Aí poderíamos dar uma semana para eles responderem e colocarem no escaninho da Neide, no Bloco 22, na Secretaria. Vocês podem fazer uma avaliação, inclusive do meu trabalho, está previsto aqui, não tem problema nenhum.

Enfim, agora nós gostaríamos muito de ouvir vocês. O que vocês acharam da atividade... né turma... A gente encerra aqui a atividade... vocês têm alguma questão para ser observada, se quiserem ver o filminho de novo, o que vocês quiserem debater.

Pessoal, o que vocês estão analisando com essa atividade. Fiquem à vontade. Eu quero ouvir vocês agora. Soltem-se e falem à vontade... Insatisfeitos, satisfeitos... à vontade.

Aluno: Eu acho que é válido toda atividade que é feita assim, que prende a atenção, porque é teoria, teoria, e é uma teoria bem aceitável, usando exemplos, eu acho que, é... dando a oportunidade de o aluno pensar, nas coisas... tendo um embasamento teórico né... se não tivesse nenhum embasamento teórico [...] mas eu acho que assim a gente nunca vai esquecer. A gente teve que pensar, discutir e depois que a gente vai aprender o certo. A

gente viu onde que a gente errou, a gente fez e errou... e aprendeu o certo... Algumas coisas estavam certas, outras não... eu acho que aí que a gente aprende, nesse sistema de botar em pratica o que você sabe e conserta o que você errou.

Professor. Antes de eu falar mais alguma coisa eu vou deixar eles se manifestarem, se quiserem, né.

Aluno: Eu achei interessante a iniciativa de discutir... igual esse negócio de duas fendas, do comportamento das ondas, em si, eram coisas que a gente já tinha visto em física o ano passado, em quântica a gente acabou vendo, mas acho que ninguém nunca parou para pensar o que acontecia... na realidade mesmo, para discutir o que está acontecendo, por que acontecia aquilo, o que aconteceu aqui no outro... sempre você via aquilo, o professor passa, você estuda prá prova e já era, já foi, você acaba eliminando, assim não, eu acho que é interessante, uma iniciativa interessante.

Aluna: A gente teve essas práticas, né... na aula de física, mas não teve esse vínculo, né... acho que isso foi interessante, um experimento simples e levar para uma dimensão, assim, atômica, nem [...] acho que facilitou mais a gente estar chegando assim, com coisas simples...

Aluno: Essa coisa bacana também, é esse leque que vai se abrindo. Cada vez a gente vai tendo mais dúvida, querendo saber mais coisas... Nesse aspecto é bem interessante [...] que a gente acaba não trabalhando na sala de aula. A gente não fica pensando nessa, nessas coisas, na amplitude do problema mesmo.

DFG: O estudo é sobre a didática mesmo, e o que se fala muito aqui na Faculdade, investigar o que o aluno sabe... NE, problematizar a questão, que é o que foi feito primeiro né... Problematizou, a gente discutiu, envolveu todo mundo prá depois você passar..., passar o conteúdo correto. Eu acho que é por aí mesmo... eu nunca tinha experimentado.

Professor: Gostou da atividade... agora em termos assim né... alguém falou alguma coisa de certo ou errado, falou de aprender os conceitos, depois debater, estabelecer o confronto com seus colegas... tal. Mas assim, em termos de aprendizado de mecânica quântica... não no sentido de resolver o problema da mecânica quântica, eu acho que nosso primeiro ponto... eu falei, olha... há um mistério na mecânica quântica e com essa atividade a gente não vai resolver esse mistério... mas apenas procurar entender, afinal, qual é esse mistério... Isso quer dizer, a atividade serviu para vocês? Vocês passaram a compreender o que se passa por trás de tudo isso aí?

Professor. Prá vocês... podem ser bastante honestos, porque o que nós estamos avaliando é a atividade e não vocês. Ficou claro a necessidade de uma descrição matemática... a impossibilidade de uma descrição física, portanto a necessidade de uma descrição matemática do sistema? Porque, por exemplo, DFG, nós aqui nas nossas atividades, primeira e segunda [...] nós não estamos atrás do certo e errado, nós estamos atrás de cada um manifestar a opinião naquilo que acha do experimento de onda, de projétil... a partir do trabalho de vocês consolidar conhecimentos já conhecidos, para partir para o contraste entre partícula, onda e comportamento de partícula-onda. Sem que estejamos preocupados se o conceito era certo, errado, se fez o desenho certo, se fez errado, não importa isso, até porque nós discutimos todos aqui... as possíveis respostas dos experimentos e elencamos essas possíveis respostas. Ok! Estou falando isso para tranquilizar vocês porque a gente não vai observar agora o certo e o errado no trabalho de vocês, mas eu vou dar um dado, por exemplo, o primeiro grupo que nós aplicamos o experimento, os alunos... alguns alunos cometeram erros, alguns nenhum erro. Aí, analisando o trabalho do aluno, nós constatamos que o erro foi cometido por conta do desenho. Então... Era o desenho que estava falho, ok? Eu refis o desenho e o resultado foi outro, aqui, em uma das atividades que nós fizemos. Portanto, a primeira atividade nossa, com o primeiro grupo de alunos serviu, como esta também vai servir para a gente detectar onde é que estava, inclusive... os pontos que nós precisávamos mudar na nossa proposta de trabalho. Inclusive a terceira seção aqui hoje foi bastante diferente da terceira seção com o outro grupo, porque a gente constatou que a ordem melhor não era aquela, então nós tivemos que inverter a ordem de algumas colocações de conversas minhas, da projeção do filminho. Tudo isso nós já mudamos em relação ao primeiro grupo. Então é disso que nós estamos atrás e é lógico, é claro também que estamos atrás de entender se afinal de contas essa conversa toda melhorou... se vocês se apoderaram de conhecimentos novos. Nesse caso, a impossibilidade da quântica fazer representação analógica do sistema.

DFG: A [...] por exemplo, o filminho... os professores passam todo o filme para depois explicar o filme [...] A gente tem que fazer primeiro para depois o filme confirmar o que a gente viu, não passar o filme para depois explicar. Isso a gente vê nas escolas, o professor passa... Aqui não, a gente está com aquela [...] tinha que desenvolver, depois confirmar.

Professor: Mas vocês sabem por que foi bom fazer essas interrupções? Porque todas as vezes que eu provoquei vocês, a percepção de vocês, por exemplo, para acompanharem o texto do Feynman. Ok? Então eu não estava esperando que vocês acompanhassem plenamente, mas o fato de vocês terem acompanhado, terem feito proposições que depois estavam sendo debatidas aí, é surpreendente. Por que é surpreendente? Porque mostra que vocês estavam plenamente sintonizados com o problema e estavam refletindo sobre ele.

DJA: [...] mas se você passasse primeiro o filme, o texto não ia ficar tão interessante.

Professor: Se eu leio o texto todo sem provocar vocês, eu só ia confirmar uma coisa que vocês já tinham na cabeça, mas primeiro eu precisava fazer com que vocês manifestassem isso. Arrancar primeiro a dúvida da cabeça de vocês para depois a gente lidar com ela. Eu simplesmente não ia perceber o que vocês tinham na cabeça, se eu passo tudo de uma vez.

DFG: [...] o certo também é o que ensinam prá você [...] perguntar.
Professor: Primeiro eu preciso saber o que vocês estão pensando... ok? Porisso que toda hora eu parava.
Professor [...] os resultados poderiam ser diferentes, não acharem interessante... não manifestarem nenhuma observação dessas, como... o filme, os conhecimentos, a forma... a apresentação do Professor. A gente instiga, mas se vocês não estiverem bastante ligados, interessados, pré dispostos a participarem vocês perdem o interesse, de cara... nessa atividade né. Então, nesse sentido eu fiquei acompanhando [...]
Professor: Até porque nós esgotamos eles, né NMM... oh, são quatro e meia. Durante três dias vocês foram abordados com coisas bastante repetitivas...
Professor: São duas horas e meia. São cinco horas e cinquenta minutos.
Professor: Todas as hipóteses que o Feynman testou e o Feynman não é um pesquisador barato, vocês trouxeram... então, vocês estavam tão ligados... vamos dar essa saída, vamos dar aquela... vocês estavam muito sintonizados... É o que eu falei realmente e a NMMconfirma. Surpreendeu o fato que vocês estavam antecipando coisas que estavam no texto. Eu pensei, como essa turma aí está propondo essas saídas, que são exatamente aquelas propostas no texto... Elas já foram esgotadas pelos cientistas e vocês já tinham capacidade de imaginar. Quando o DFG falou assim: talvez o elétron se divida, eu lembrei exatamente a cena do filminho... Era de se esperar que vocês não conseguissem tirar nenhuma hipótese. Por quê? Porque de princípio, se você não estiver muito antenado, você pode dizer: eu não sei, não sei como fazer... Mas vocês foram atrás das hipóteses, por mais escabrosas que elas possam parecer. Estavam no texto, no filminho... Vocês cresceram bastante... A proposta seria fazer [...] quem vai fazer mestrado aqui, com co-orientação do Aguinaldo ou até possibilidade de o aluno mudar para fazer o mestrado em Bauru, na área de ensino de terceiro grau. Eu já vi aqui uma possibilidade... Houve esse contato lá, com o Aguinaldo que é o orientador da Neide. Essa possibilidade está aberta... O importante é que haja o interesse de vocês... Está aberta a possibilidade, o ano que vem ou um pouco mais tardiamente, porque o ano que vem vocês estarão no quarto ano, ou ainda, trabalhar com a NMMassim que ela se doutorar.

Pesquisadora: A continuidade também poderia ser dada com grupo de estudo formado por quem tiver interesse.
Professor: Ah, sim a continuidade... quem quiser assumir, quem tiver interesse a possibilidade de início é... eu diria o ano que vem realmente, como um trabalho quase de iniciação como um preparo, ou [...] quem tiver interesse já tem o que fazer... Ok, mais algum comentário? Então Neide, você quer finalizar com mais algum comentário ou deixamos para finalizar somente depois... da semana de química.
NMM: Eu acho que sim... logo depois.

Professor: Quando vai ser a atividade final? Onde vocês querem esgotar nossa atividade? Depois da abertura da semana da química?
DFG: Depois da abertura...
Professor: Depois da abertura...
Professor: Pessoal, muito obrigado, mais uma vez tenham uma boa semana de química e nós contamos com vocês para [...] tudo próximo, ta [...]