



Danilo Cardoso Ferreira

ELABORAÇÃO DE UM MATERIAL DIDÁTICO APLICADO AO ENSINO DE FÍSICA PARA UTILIZAÇÃO DO EXPERIMENTO VIRTUAL DA DUPLA FENDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Presidente Prudente/SP
Dezembro de 2015

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. MOACIR PEREIRA DE SOUZA FILHO
(ORIENTADOR)



PROF. DR. ANGEL FIDEL VILCHE PEÑA
(FCT/UNESP)



PROF. DR. CELSO CARDOSO XAVIER
(FCT/UNESP)



PROF. DR. CÍCERO RAFAEL CENA DA SILVA
(IFSP/ BIRIGUI)



DANILO CARDOSO FERREIRA

PRESIDENTE PRUDENTE, 15 DE DEZEMBRO DE 2015.

RESULTADO: APROVADO

FICHA CATALOGRÁFICA

F44e Ferreira, Danilo Cardoso.
Elaboração de um Material Didático Aplicado ao Ensino de Física para Utilização do Experimento Virtual da Dupla Fenda / Danilo Cardoso Ferreira.
- Presidente Prudente: [s.n], 2015
143 f.

Orientador: Moacir Pereira de Souza Filho
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Ensino de mecânica quântica. 2. Experimento da dupla fenda. 3. Experimentos virtuais. I. Ferreira, Danilo Cardoso. II. Souza Filho, Moacir Pereira de . III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Elaboração de um Material Didático Aplicado ao Ensino de Física para Utilização do Experimento Virtual da Dupla Fenda.

Dedico esta dissertação a minha esposa *Michelle de Souza Prado* a qual prometi dentro do sacramento do matrimônio “Eu derramo o meu sangue, mas não desisto de você”.

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai por ter me concedido o dom da vida. Mais do que isto, o Senhor me concedeu os *dons* do Espírito Santo pois sou herdeiro de Seu Filho, o Cristo. Ao meu bom Senhor Jesus Cristo agradeço por ter deixado que eu depositasse em Seu Coração Santo todas as angústias, tristezas e momentos de desespero. Ainda agradeço ao Espírito Santo e ao meu Anjo da Guarda, pois em nenhum momento, não me deixaram sozinho.

Agradeço a intercessão da Sagrada Família. Ao menino Jesus que sempre passeia pela minha casa, a minha Mãe Maria Santíssima a quem sou consagrado e São José, meu exemplo de como se comportar e pensar como esposo e pai.

A minha esposa, Michelle de Souza Prado, agradeço por sua dedicação e apoio em todo o desenvolvimento deste trabalho. Mesmo cansada, para que eu não viajasse sozinho, me acompanhava e acompanha. Agradeço pela paciência em inúmeras viagens exaustivas, me esperando longas horas durante disciplinas e reuniões, sempre cuidando de mim. E também por aceitar a jornada de ser uma só carne e se unir em um só espírito comigo. Michelle, eu te amo.

Ao meu orientador, o prof. Moacir Pereira de Souza Filho, agradeço por ter aceitado me orientar. Pela paciência e dedicação em inúmeras correções. E também por ser um exemplo de educação, respeito e ética.

Agradeço ao meu sogro Sr. Miguel e a minha sogra Dona Vilma pelo carinho e apoio.

Agradeço a Capes pelo apoio financeiro e a Sociedade Brasileira de Física pelo desenvolvimento deste projeto especial denominado MNPEF.

Não posso deixar de agradecer à secretaria de pós – graduação pela paciência, orientação e agilidade em atender com presteza e respeito.

Agradeço ao meu avô, José Ferreira (*in memoriam*) que infelizmente não pode participar da celebração do meu matrimônio e nem pode me ver defendendo este título. Obrigado vô por ter acreditado em mim. Agradeço ao meu tio Rodney (*in memoriam*).

Ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) agradeço pelo afastamento neste último período de estudo.

Agradeço a todos os professores que lecionaram disciplinas no MNPEF e se dedicaram para este projeto ser excelência.

Consagro este trabalho ao Sagrado Coração de Jesus, ao Coração Imaculado da Virgem Maria e a São José, rogando que o abençoe.

“Porém, ainda que a fé esteja acima da razão, não poderá jamais haver verdadeira desarmonia entre uma e outra, porquanto o mesmo Deus que revela os mistérios e infunde a fé dotou o espírito humano da luz da razão; e Deus não poderia negar-se a si mesmo, nem a verdade jamais contradizer a verdade”. “Portanto, se a pesquisa metódica, em todas as ciências, proceder de maneira verdadeiramente científica, segundo as leis morais, na realidade nunca será oposta a fé”.

(Catecismo da Igreja Católica, §159)

RESUMO

ELABORAÇÃO DE UM MATERIAL DIDÁTICO APLICADO AO ENSINO DE FÍSICA PARA UTILIZAÇÃO DO EXPERIMENTO VIRTUAL DA DUPLA FENDA

Danilo Cardoso Ferreira

Orientador:

Prof. Dr. Moacir Pereira de Souza Filho

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A mecânica quântica é uma das áreas da Física que surgiu em meados de 1900 e permanece em desenvolvimento até os dias atuais. Diversos aparatos tecnológicos são consequência deste importante ramo da Física que também contribui com a Medicina, Matemática, Filosofia, Literatura e Biologia. Logo, é imprescindível que o contato com esta ciência ocorra no contexto do ensino médio. Para inserir o estudante no mundo da mecânica quântica, isto é, na física do infinitamente pequeno, o aluno deve abandonar o pensamento clássico e pensar em termos do comportamento quântico e do indeterminismo no processo de medida, isto é, desenvolver a capacidade de abstração. Sendo este, o objetivo deste trabalho. Para tanto, foi escolhido o experimento da dupla fenda que permite trabalhar com a dualidade onda-partícula do elétron e do fóton. Por meio deste experimento, o aluno pode ser inserido paulatinamente numa trajetória rumo a descrição quântica necessária para o exame dos fenômenos subatômicos. A análise experimental é cuidadosamente realizada com o auxílio de laboratórios virtuais, disponibilizados gratuitamente em sítios eletrônicos, os quais representam um recurso que permite realizar procedimentos experimentais que necessitariam de grande aparato laboratorial. O experimento da dupla fenda é analisado em três etapas, relatadas a seguir: (i) a dupla fenda com partículas clássicas; (ii) a dupla fenda com ondas clássicas e; (iii) a dupla fenda com objetos quânticos como elétrons e fótons. O objetivo é demonstrar o comportamento dual do elétron. Posteriormente, para concluir de forma precisa e justificar o comportamento quântico do elétron é apresentado o princípio da indeterminação de Heisenberg e suas implicações filosóficas. Sendo assim, o objetivo central desta pesquisa é buscar integrar o comportamento quântico, que acontece na escala atômica, principalmente no contexto do ensino médio. Algumas orientações sobre como aplicar este trabalho em outros níveis

de ensino aparecem no decorrer do texto e nos apêndices. Apresentando o comportamento dual, onda-partícula, do elétron, a interpretação probabilística e o princípio de incerteza. Acreditamos que o aluno será capaz de compreender um grande número de fenômenos que acontece em escalas que não são do domínio da mecânica clássica quando, em contato com estes temas. Este tema faz parte do conteúdo de física moderna contemporânea que vem sendo abordado em livros textos e vestibulares. Além disso, algumas das novas tecnologias utilizam a física quântica, desde microscópios eletrônicos, nanotecnologia, computação quântica, semicondutores, diodos (incluindo o LED), transistores, computadores, tablets, GPS, satélites, radares, aviões, lasers, scanners de código de barras, sistemas militares de defesa, CD e Blu-Ray players, criptografia, células fotoelétricas, sensores diversos, basicamente, tudo que é eletrônico. Um dos objetivos do trabalho é verificar quais os conhecimentos prévios o corpo discente possui, antes do contato com o conteúdo de física quântica, ou seja, o que faz parte do senso comum sobre este tema. Além disso, pretendemos verificar se o aluno consegue: i) distinguir, no final da aplicação desta pesquisa, que as leis da física em escalas atômicas são diferentes das leis da física clássica, ii) a importância da mecânica quântica na tecnologia e na sociedade.

Palavras chave: Ensino de mecânica quântica, Experimento da dupla fenda, Experimentos virtuais.

ABSTRACT

PREPARATION OF A DIDACTIC MATERIAL TO THE PHYSICAL EDUCATION FOR USE OF VIRTUAL EXPERIMENT OF DOUBLE-SLIT

Danilo Cardoso Ferreira

Supervisor:

Prof. Dr. Moacir Pereira de Souza Filho

Master's dissertation submitted to the Post-Graduate Program in Physical Education, Faculty of Science and Technology of the Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente, in the Course of Professional Master of Physical Education (MNPEF) as part of the requirements for obtaining the Master's degree in Physics Teaching.

Quantum mechanics is one of the areas of physics that emerged in mid-1900 and remains in development to the current day. Several technological devices are a result of this important branch of physics that also helps to Medicine, Mathematics, Philosophy, Literature and Biology. Therefore, it is essential that contact with this science occurs at the high school level, what actually occurs in a limited way, when it happens. To place the student in the world of quantum mechanics, that is, the infinitely small of physics, the student must leave the classical thought and think in terms of the quantum behavior and indeterminacy in the measurement process, namely to develop the capacity for abstraction. This is accurately the aim of this work. Thus, the double-slit experiment that lets you work with the wave-particle duality of the electron and the photon was chosen. Through this experiment, students can be gradually inserted on a path toward quantum description necessary for the examination of subatomic phenomena. The experimental analysis is carefully performed with the aid of virtual laboratories, available for free in electronic sites, which represent a resource to perform experimental procedures that would require large laboratory apparatus. The double slit experiment is analyzed in the following three steps, reported: (i) the slit paired with classical particles; (ii) the double slit and with classical waves; (iii) the double slit with quantum objects such as electrons and photons. The goal is to demonstrate the electron dual behavior. Later to complete accurately and justify the electron quantum behavior shows the principle of indeterminacy of Heisenberg and its philosophical implications. Thus, the main objective of this research is to seek to integrate quantum behavior, which takes place at the atomic scale, especially in the high school level. Some guidance on how to apply this work in other levels of education appear throughout the text and in the appendices. Introducing the dual behavior wave-particle, the electron, the probabilistic interpretation and the uncertainty principle. We believe that students will be able to understand a number of phenomena that occurs on scales

that are not the classical mechanics of the domain when in contact with these topics. This topic is part of the contemporary modern physics content that is being addressed in texts and entrance exam books. In addition, some of the new technologies using quantum physics, from electronic microscopes, nanotechnology, quantum computing, semiconductors, diodes (including LED), transistors, computers, tablets, GPS, satellites, radar, aircraft, lasers, code scanners bars, military defense systems, CD and Blu-Ray players, encryption, photoelectric cells, various sensors, basically, everything is electronic. One of the goals of the work is to check what prior knowledge the student body has, before contact with quantum physics content, so the part of common sense on this issue. In addition, we intend to verify that the student is able to: i) distinguish, at the end of the application of this research, that the laws of physics at atomic scales are different from the laws of classical physics, ii) the importance of quantum mechanics in technology and society.

Keywords: Quantum mechanics teaching, the double-slit experiment, virtual experiments.

Lista de Figuras

2.1	Experimento de Feynman e colaboradores com projéteis sem o detector de partículas (visão em perspectiva).	31
2.2	Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis (nesta figura aparece o detector de partículas).	33
2.3	Questão 1 do questionário 1	34
2.4	Questão 2 do questionário 1	35
2.5	Questão 3 do questionário 1	35
2.6	Questão 4 do questionário 1	35
2.7	Experimento da dupla fenda com partículas.	36
2.8	Probabilidades com as duas fendas abertas. <i>a)</i> probabilidades P_1 e P_2 separadamente. <i>b)</i> a soma de $P_1 + P_2$	37
3.1	Experimento virtual Onda em corda. Visão de abertura do experimento antes do início da atividade. (Retirado do PHET e adaptado pelo autor) .	41
3.2	Experimento virtual Onda em corda	42
3.3	Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da esquerda é aproximadamente 9 cm (as setas de orientação são nossas). . . .	43
3.4	Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da direita é aproximadamente 18 cm (setas de orientação são nossas).	43
3.5	Experimento virtual Onda em corda. Superposição dos dois pulsos. O valor da amplitude resultante é aproximadamente 27 cm.	44
3.6	Após a interferência os dois pulsos retornam suas características iniciais como se nada houvesse ocorrido (as setas de orientação do movimento do pulso são nossas).	45
3.7	Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da esquerda é aproximadamente 18 cm (setas de orientação nossas).	46
3.8	Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da direita é aproximadamente 9 cm (as setas de orientação do movimento do pulso e as representações das amplitudes por a_1 e a_2 são nossas).	46
3.9	Experimento virtual Onda em corda. Superposição dos dois pulsos. O valor da amplitude resultante é aproximadamente 9 cm.	47

3.10	Experimento virtual Onda em Corda. Após a interferência os dois pulsos retornam suas características iniciais como se nada houvesse ocorrido (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).	47
3.11	Experimento virtual Onda em Corda. Mostra a linha de referência móvel.	48
3.12	Experimento virtual Onda em Corda. Os dois pulsos invertidos possuem amplitudes iguais (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).	49
3.13	Experimento virtual Onda em Corda. Quando ocorre interferência destrutiva total é destruído todos os efeitos que onda produziria.	49
3.14	Experimento virtual Onda em Corda. Os dois pulsos recuperam suas características anteriores a superposição (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).	50
3.15	Efeito da Difração em um trem de ondas retas. O tamanho do orifício deve ser menor ou igual ao comprimento de onda do trem de ondas.	50
3.16	Efeito da Difração em um trem de ondas retas que atravessou um orifício. O tamanho do orifício deve ser menor ou igual ao comprimento de onda do trem de ondas.	51
3.17	Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ	52
3.18	Questão 1 do questionário 2	52
3.19	Questão 2 do questionário 2	53
3.20	Questão 3 do questionário 2	54
3.21	Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.	54
3.22	Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).	55
3.23	Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).	55
4.1	Gráfico de probabilidade com as duas fendas abertas.	60
4.2	Gráfico de intensidade da onda. $I_1(x)$ é a intensidade quando a fenda 2 está coberta. $I_2(x)$ é a intensidade quando a fenda 1 está coberta.	60
4.3	Gráfico de interferência de duas ondas difratadas no experimento de Feynman.	61
4.4	Questão 1 do questionário 3	62
4.5	Questão 2 do questionário 3	63

4.6	Questão 3 do questionário 3	63
4.7	Experimento virtual Interferência de Ondas com uma fenda.	64
4.8	Experimento virtual Interferência de Ondas com uma fenda. Com nossas alterações.	65
4.9	Experimento virtual Interferência de Ondas com duas fendas abertas. Com nossas alterações.	65
4.10	Experimento virtual Interferência de Ondas mostrando a interferência da luz de uma lâmpada que atravessa duas fendas.	66
4.11	Experimento virtual Interferência de Ondas. <i>a)</i> a fenda da direita foi tampada. O comportamento do fóton volta a ser clássico. <i>b)</i> a fenda da esquerda foi tampada. O comportamento do fóton volta a ser clássico	66
4.12	Experimento virtual Interferência Quântica. Podemos observar a interferência de elétrons com a formação das três colunas espaçadas por espaços vazios.	67
4.13	Experimento virtual Interferência Quântica. Podemos observar a destruição do padrão de interferência devido a maior concentração de partículas em um ponto específico da tela	68
5.1	Elétron sai de <i>s</i> passa pela fenda 1 espalha um fóton no detector D_1	78
5.2	Elétron sai de <i>s</i> passa pela fenda 2 espalha um fóton no detector D_1	78
5.3	Elétron sai de <i>s</i> passa pela fenda 2 espalha um fóton no detector D_2	79
5.4	Elétron sai de <i>s</i> passa pela fenda 1 espalha um fóton no detector D_2	79
7.1	Questão 1 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	90
7.2	Questão 2 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	90
7.3	Questão 3 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	91
7.4	Questão 4 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	91
7.5	Questão 5 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	91
7.6	Questão 6 do questionário 1 respondida por quatro alunos.	92
7.7	Questão 1 do questionário 2 respondida por quatro alunos.	92
7.8	Questão 2 do questionário 2 respondida por quatro alunos.	93
7.9	Questão 3 do questionário 2 respondida por quatro alunos.	93
7.10	Questão 4 do questionário 2 respondida por quatro alunos.	93
7.11	Questão 1 do questionário 3 respondida por quatro alunos.	94
7.12	Questão 2 do questionário 3 respondida por quatro alunos.	95
7.13	Questão 3 do questionário 3 respondida por quatro alunos.	95
7.14	Questão 4 do questionário 3 respondida por quatro alunos.	95
7.15	Experimento virtual da dupla fenda com partículas desenvolvido por um grupo de alunos do ensino médio. <i>a)</i> fenda 2 está coberta <i>b)</i> as duas fendas estão abertas.	96

A.1	Slide 1 do Produto Final	105
A.2	Slide 2 do Produto Final	106
A.3	Slide 3 do Produto Final	106
A.4	Slide 4 do Produto Final	107
A.5	Slide 5 do Produto Final	107
A.6	Slide 6 do Produto Final	108
A.7	Slide 7 do Produto Final	108
A.8	Slide 8 do Produto Final	109
A.9	Slide 9 do Produto Final	109
A.10	Slide 10 do Produto Final	110
A.11	Slide 11 do Produto Final	110
A.12	Slide 12 do Produto Final	111
B.1	Questão 1 - Aluno aleatório I	112
B.2	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório I	113
B.3	Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório I	114
B.4	Questão 1 - Aluno aleatório II	115
B.5	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório II	116
B.6	Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório II	117
B.7	Questão 1 - Aluno aleatório III	118
B.8	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório III	119
B.9	Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório III	120
B.10	Questão 1 - Aluno aleatório IV	121
B.11	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório IV	122
B.12	Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório IV	123
C.1	Questão 1 - Aluno aleatório I	124
C.2	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório I	125
C.3	Questão 4 - Aluno aleatório I	126
C.4	Questão 1 - Aluno aleatório II	127
C.5	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório II	128
C.6	Questão 4- Aluno aleatório II	129
C.7	Questão 1 - Aluno aleatório III	130
C.8	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório III	131
C.9	Questão 4 - Aluno aleatório III	132
C.10	Questão 1 - Aluno aleatório IV	133
C.11	Questões 2 e 3 - Aluno aleatório IV	134
C.12	Questão 4 - Aluno aleatório IV	135
D.1	Questões 1 e 2 - Aluno aleatório I	136

D.2	Questões 3 e 4 - Aluno aleatório I	137
D.3	Questões 1 e 2 - Aluno aleatório II	138
D.4	Questões 3 e 4 - Aluno aleatório II	139
D.5	Questões 1 e 2 - Aluno aleatório III	140
D.6	Questões 3 e 4 - Aluno aleatório III	141
D.7	Questões 1 e 2 - Aluno aleatório IV	142
D.8	Questões 3 e 4 - Aluno aleatório IV	143

Lista de Tabelas

4.1	Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas	69
4.2	Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas e o acréscimo de instrumentos nas regiões das fendas. . .	70
4.3	Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas e o acréscimo de instrumentos nas regiões das fendas utilizando notação sintética.	70
5.1	Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pela fenda F_1 e espalha um fóton no detector D_1	77
5.2	Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pela fenda F_2 e espalha um fóton no detector D_1	77
5.3	Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pelas fendas F_1 e F_2 e espalham fótons no detector D_1	77
5.4	Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pelas fendas F_1 e F_2 e espalham fótons no detector D_2	79

Sumário

1	Introdução	19
1.1	O problema de pesquisa	20
1.2	Justificativas	23
1.3	Objetivos	25
1.4	Estrutura da Dissertação	25
2	Experimento da Dupla Fenda com Partículas	27
2.1	Partículas em Experimentos com Uma e Duas Fendas	30
2.2	Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda	33
2.3	Explicação do Experimento da Dupla Fenda com Partículas Clássicas	36
3	Experimento da Dupla Fenda com Ondas Clássicas	40
3.1	Interferência de Ondas Unidimensionais	40
3.2	Difração de Ondas	50
3.3	Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda	52
3.4	Análise Matemática das Intensidades	56
4	Experimento da Dupla Fenda com Objetos Quânticos	59
4.1	Questionário 3 – Elétrons no Experimento da Dupla Fenda	59
4.2	Comportamento Quântico	63
4.3	Experimento Virtual da Dupla Fenda com Detectores	66
4.4	Realismo Dualista Objetivo	68
4.5	Escola de Copenhagen	71
5	O Formalismo Matemático da Mecânica Quântica	73
5.1	Vetores de Estado	74
5.2	O Padrão de Interferência de Duas Fendas	76
6	Metodologia	81
6.1	Processo de Escolha do Experimento Virtual	82
6.2	Justificativas do uso de Experimentos Virtuais no Ensino de Física	83
6.3	Quanto a Cognição com Experimentos Virtuais	86

7	Resultados e Considerações Finais	89
7.1	Análise da Aplicação do Questionário 1	89
7.2	Análise da Aplicação do Questionário 2	91
7.3	Análise da Aplicação do Questionário 3	93
7.4	Experimento Virtual da Dupla Fenda com Projéteis (desenvolvido pelos alunos)	94
7.5	Considerações finais	97
	Referências	99
A	Produto Final	105
B	Amostragem do Questionário 1	112
C	Respostas do Questionário 2	124
D	Respostas do Questionário 3	136

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação trata da proposta do uso de experimentos virtuais para o ensino de física. Escolhemos como assunto: introdução a mecânica quântica através do experimento da dupla fenda com partículas, ondas e elétrons proposto por Richard Feynman¹ (1918 – 1988) e colaboradores (FEYNMAN *et. al.*, 2008). Para a referida aplicação de atividades experimentais virtuais elaboramos uma apostila, disponibilizada no apêndice A. Tal trabalho foi aplicado em duas escolas da rede de ensino público, na terceira série do ensino médio em uma escola que pertence a Secretária da Educação do Estado de São Paulo, na quarta série do ensino médio em um Instituto Federal de Educação do Paraná. Embora esta pesquisa tenha sido elaborada para o Ensino Médio, ela pode ser facilmente adequada para cursos de graduação em física e química. Tanto no decorrer do texto, quanto nos apêndices, mostramos como este trabalho pode ser ampliado para o nível universitário.

O interesse no ensino de mecânica quântica surgiu na soma de quatro fatores: *i*) a importância da dualidade onda-partícula para a evolução teórica, filosófica, histórica e tecnológica da física. Consequentemente esta evolução corroborou com as distintas interpretações da mecânica quântica, sejam elas: interpretação realista e interpretação de Copenhagen² ; *ii*) a importância na tecnologia, como a informática e a eletrônica, atualmente tão relevantes na sociedade, surgiram através dos avanços deste ramo da física; *iii*) a formulação matemática da teoria que explica perfeitamente os resultados experimentais; *iv*) os atuais Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio - Física (PCN+), prevê uma divisão da física por temas: 1. *Movimentos: variações e conservações*; 2. *Calor, ambiente e usos de energia*; 3. *Som, imagem e informação*; 4.

¹Escolhemos a abordagem realizada por Feynman devido a questões didáticas contidas neste trabalho. Outros autores como LOPES e NUSSENZVEIG também fazem uso da sequência partículas clássicas, ondas clássicas e objetos quânticos no experimento da dupla fenda.

²Existem outras interpretações como: teoria de variáveis ocultas, interpretação dos muitos mundos e posição agnóstica. Esta última acredita não ser necessário responder questões como localidade. Discutiremos mais no capítulo 4. Optamos pelas duas interpretações por se relacionarem melhor com os objetivos desta pesquisa.

Equipamentos elétricos e telecomunicações; 5. Matéria e radiação e; 6. Universo, Terra e vida. A mecânica quântica pode ser discutida em todos os seis temas estruturadores, principalmente nos temas 3 a 6³. Sendo assim, acreditamos que esta inserção pode ser realizada sem profundas dificuldades. Pelo contrário, a interação entre matéria e radiação, apenas pode ser explicada, satisfatoriamente, através da mecânica quântica.

Entendemos ainda que o ensino de mecânica quântica deve acontecer no ensino médio de forma mais intensa, pois privilegia competências como: *i*) investigação e compreensão dos fenômenos físicos *ii*) respeito à utilização da linguagem física e de sua comunicação e; *iii*) contextualização histórico e social. Estas competências, que possuem a finalidade de estabelecer vínculos com outras áreas, são exaltadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio – PCNEM (BRASIL, 2013). Durante esta dissertação, discutiremos como esta proposta de trabalho, através de experimentos virtuais sobre fenômenos com aparatos da dupla fenda, podem colaborar com as expectativas do PCNEM (BRASIL, 2013).

1.1 O problema de pesquisa

Até meados de 1900, o determinismo da mecânica clássica de Newton era aplicado em todas as situações que necessitavam da análise do movimento (GREF, 2007). Com as leis de conservação da quantidade de movimento linear, lei da conservação da quantidade de movimento angular e o teorema da conservação da energia mecânica, praticamente qualquer sistema mecânico poderia ser analisado. Além disso, em 1831, William Rowan Hamilton (1805 – 1865) já havia proposto uma analogia entre a ótica geométrica e a mecânica clássica (NUSSENZVEIG, 1998), ou seja, as fronteiras da mecânica clássica foram ampliadas com a fusão entre a mecânica e a ótica. Em 1864, James Clerk Maxwell (1831 – 1879), em seu trabalho “*Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético*” (NUSSENZVEIG, 1998), descreveu todo o eletromagnetismo no vácuo através de quatro equações, consistentes com os princípios da eletricidade, como a conservação da carga elétrica. Estes são apenas alguns exemplos de como a física aparentava convergir para uma ciência acabada (CARRON, 2002) e que explicava os fenômenos da natureza em intervalos de tempo curtos, com excelente precisão. Entretanto, o efeito fotoelétrico descoberto por Franck e Hertz (CHESMAN *et. al.*, 2004) a teoria atômica (HALLIDAY, *et. al.*, 2007) a radiação do corpo negro e alguns outros fenômenos ainda não haviam explicações consistentes.

Em 1905 (CLÁSSICOS DA CIÊNCIA, 2001) Albert Einstein (1879 – 1955) publica três célebres artigos de extrema importância para a ciência. Um artigo faz referência

³Especificamente o tema 1 trata do ensino de mecânica clássica e o tema 2 poderiam ser tratados assuntos de radiação do corpo negro, por exemplo. Logo, a restrição aos temas de 3 a 6 é devido ao conteúdo deste trabalho.

ao movimento browniano das moléculas, conseqüentemente a existência de átomos era a justificativa para ocorrer este fenômeno. O segundo trabalho, sobre relatividade especial (RESNICK, 1971), vinha acoplar as equações descobertas por Lorentz em referenciais inerciais ao eletromagnetismo e a mecânica clássica de Newton. Este artigo veio confrontar as teorias de Newton e Maxwell rivalizando-as. Se a teoria de Newton estivesse correta conseqüentemente a teoria de Maxwell estaria errada em alguns pontos, o contrário também era válido. A relatividade especial de Einstein não foi aceita de imediato pois questionava fortemente a teoria de Newton (REIS, *et. al.*, 2002; WOLFF, 2005), conseqüentemente questionava o determinismo que carrega consigo implicações filosóficas e religiosas. O terceiro trabalho explicava o efeito fotoelétrico (TIPLER, LLEWELLYN; 2001), trabalho que rendeu a Einstein o prêmio Nobel de 1921. Neste artigo, Albert Einstein usa o fato da energia não poder ser analisada como contínua, quando observada em meios atômicos. Nesta experiência, considera-se o fato da energia ser quantizada e os fótons se comportarem como partículas que tiram elétrons do metal, dependendo da frequência da luz e do material. Desta forma, pode se explicar teoricamente a descoberta de Hertz (CHESMAN *et. al.*, 2004) sobre o efeito fotoelétrico.

Max Planck (1858 – 1947), em 1900, foi o primeiro a propor na análise da radiação do corpo negro a equação que relacionava a *energia* com a *frequência*, a mesma utilizada por Einstein para interpretar o efeito fotoelétrico. Este momento marca a divisão histórico-didática da Física (CALÇADA, SAMPAIO; 2001), a qual foi denominada Física Moderna e Contemporânea (FMC). Após tantos trabalhos, que mudaram o rumo da física e da afirmação irrefutável da existência do átomo (CLÁSSICOS DA CIÊNCIA, 2001), iniciou-se a proposta de trabalhos propondo modelos atômicos que abandonassem as teorias clássicas para responder aos resultados experimentais das inúmeras experiências daquela época, por exemplo, os espectros de emissão dos elementos. Neste momento, J. J. Thomson (1856 – 1940) já havia descoberto o elétron e Ernest Rutherford (1871 – 1937), em 1910, havia descoberto o núcleo do átomo (TIPLER, LLEWELLYN; 2001). Em 1912, Niels Bohr (1885 – 1962), fez uso das teorias de Planck e Einstein sobre quantização, afinal as teorias da mecânica clássica não explicavam o problema de um elétron orbitando um próton no átomo de hidrogênio sujeito apenas à força coulombiana (NUSSENZVEIG, 1998; REIS, *et. al.*, 2002). Bohr propõe quatro postulados que explicavam porque o elétron não realizava um movimento elíptico até colidir com o núcleo do átomo. Estes postulados funcionavam muito bem para o átomo de hidrogênio, contudo, para átomos com mais elétrons a teoria falhava. Entretanto, o modelo atômico de Bohr trouxe o primeiro número quântico n , o número quântico principal. Em 1923, o físico Louis de Broglie, fazendo uso da teoria de Bohr, ou seja, que inclui a quantização de Einstein-Planck e a analogia ótico-mecânica de Hamilton, propôs que partículas como fótons que manifestavam efeitos que as caracterizavam como partículas, mas que ao mesmo tempo dependiam de propriedades ondulatórias (FEYNMAN *et. al.*, 2008). Com de Broglie, surgiu um novo modelo

atômico que incluía também o movimento ondulatório do elétron. Entretanto, aceitar este modelo significa afirmar que o elétron, que sempre foi encarado como partícula e, que afinal possuía massa bem definida, se comportava como uma onda.

Para entender o contraste entre os diferentes tipos de comportamentos, isto é, ondulatório e corpuscular, foi proposto a análise do experimento da dupla fenda (DICKE, WITTKKE, 1961; COHEN-TANNOUDJI *et. al.*, 1977; GASIOROWICZ, 1979; LOPES, 1992; MERBACHER, 1997; PESSOA Jr., 2003; NUSSENZVEIG, 2008; MAHON, 2011) em termos de conceitos clássicos de ondas e partículas e também objetos quânticos. Realizar o experimento da dupla fenda com partículas clássicas não necessita de aparatos tecnológicos caros. Quando se usa ondas clássicas, verificar a interferência das ondas exige mais do experimentador. Mas, quando experimento da dupla fenda é feito com luz, por exemplo, o aparato experimental necessita de mais tecnologia e os custos podem ser dispendiosos. Devido a estes fatos escolhemos realizar toda a análise com experimentos virtuais.

O experimento da fenda dupla com ondas clássicas, experimento de Young, mostra a interferência entre as ondas difratadas. Para que isto ocorra é necessário que a largura da fenda seja igual ou menor que a ordem de grandeza do comprimento da onda que atravessa as fendas. A experiência da dupla fenda e partículas clássicas, quando analisado em termos de probabilidade, não mostra interferência. Sendo o elétron uma partícula, esperava-se que quando fosse realizado o experimento da dupla fenda, o elétron não apresentasse interferência, como acontece com partículas clássicas, porém, o elétron apresenta interferência colocando seu comportamento ondulatório em evidência. Além deste resultado absurdo, quando tentamos observar o elétron iluminando as fendas por onde ele passa, o resultado da experiência é o comportamento corpuscular do elétron. Ou seja, o elétron é uma partícula que se comporta como onda, em alguns casos, mas, quando observado, volta a se comportar como partícula. Para compreender o que acontece com elétron neste experimento, é necessário abandonar o determinismo da teoria clássica de Newton e realizar uma análise estatística e conseqüentemente aplicar a teoria de probabilidade no experimento. É exatamente isto que esta pesquisa pretende. Inserir o estudante em um meio que é necessário pensar quanticamente devido a escala da ordem atômica e, conseqüentemente, distinguir os fenômenos clássicos dos quânticos.

A mecânica quântica possui profunda relevância no ensino de física. Entretanto, quase que exclusivamente este ramo tem sido ensinado apenas nos cursos de graduação ou pós – graduação nas áreas de ciências exatas. Uma única afirmação, dentre algumas que destacaremos, torna este assunto indispensável: “*Temos a eletrônica e a informática graças a mecânica quântica*”⁴. Pode parecer um exagero, mais os desenvolvimentos da nanotec-

⁴Esta afirmação é feita pelo prof. Eduardo Cantera Marino em sua palestra “*Quem tem medo de mecânica quântica*”. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=eqtSjQKp0hM>. Tal afirmação é corroborada com o artigo da Revista da USP do prof. Antônio José Roque da Silva disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revusp/article/viewFile/13641/15459> ambos acessado em 10/12/2015.

nologia e eletrônica moderna estão intimamente ligados aos desenvolvimentos da física quântica. Não seria este um argumento plausível para se ensinar mecânica quântica no ensino médio? Ora, uma resposta negativa a esta questão seria destacar que a formulação teórica e matemática da mecânica quântica não conduz diretamente a explicações das novas tecnologias de forma tão explícita como as leis de Newton. Sabemos, pelas leis de Newton, que são necessárias forças externas para colocar um dado objeto em movimento e aplicamos estas leis a diversas situações. E a mecânica quântica, quais leis poderão ser aplicadas a tantas situações como as leis de Newton? De fato, a mecânica quântica não possui esta aplicação tão objetiva como as leis newtonianas. Entretanto, são necessárias estabelecer consideráveis condições iniciais para se aplicar as leis de Newton, como: extinguir a resistência do ar, atrito, solo perfeitamente polido e horizontal, dentre tantos exemplos. Um trunfo da mecânica quântica neste aspecto é que seus postulados explicam perfeitamente os experimentos relacionados a teoria, além de possuir um grau de precisão muito maior que a mecânica de Newton.

Entendemos que é necessário mostrar este novo mundo de fenômenos que ocorrem na escala subatômica. Todavia, se ainda todas as argumentações anteriores não fundamentarem a importância da mecânica quântica, comparamos a necessidade do estudo deste ramo da física com a astronomia. Para isto, citamos Poincaré (1998) que defende a importância da astronomia destacando os feitos que foram possíveis devido ao avanço do entendimento desta ciência tão antiga. Através de comparações e exemplos, ele explica o porquê a astronomia deve ser estudada.

A astronomia é útil porque nos eleva acima de nós mesmos; é útil porque é grande; é útil porque é bela; é isso que precisa se dizer. É ela que nos mostra como quão pequeno é o homem no corpo e quão grande é no espírito, já que essa imensidão resplandecente, onde seu corpo não passa de ponto obscuro, sua inteligência pode abarcar inteira, e dela fruir a silenciosa harmonia (POINCARÉ, 1998, p.101).

Não obstante, refletindo sobre a mecânica quântica como Poincaré dialogou sobre a astronomia: a mecânica quântica nos faz questionar a inquestionável, como as noções de localidade, realidade e causalidade; é útil na tecnologia, como eletrônica e informática; é bela como se afunila perfeitamente com sua formulação matemática. É ela que mostra que somos constituídos de partículas que se comportam de uma forma misteriosa e o quão pequenos somos, pois não conseguimos nem ao menos explicar o comportamento das partículas fundamentais que nos constituem.

1.2 Justificativas

Para a compreensão da dualidade onda-partícula do elétron, o corpo discente necessita abandonar o pensamento clássico e determinístico. Abandonar as leis da física clássica,

não significa imputar que a mesma esteja errada. Apenas que na escala atômica necessita-se utilizar a mecânica quântica e, em velocidades acima de 10% da velocidade da luz (EINSTEIN, 1999; 2003), é necessário utilizar a teoria da relatividade especial de Einstein. É válido lembrar que, em baixas velocidades, ou seja, aquelas em que as velocidades são inferiores à 10% da velocidade da luz, a teoria da relatividade restrita retorna a mecânica clássica e, quando se usa o princípio da correspondência, a mecânica quântica também retorna a mecânica newtoniana. Logo, a mecânica clássica continua válida e se torna um caso nos limites da relatividade einsteiniana e da mecânica quântica.

Atualmente somos absorvidos por novas tecnologias quase que constantemente. A exemplo das tecnologias que utilizam a mecânica quântica para seu desenvolvimento, temos desde microscópios eletrônicos, nanotecnologia, computação quântica, semicondutores, diodos e transistores. A mecatrônica, automação e robótica também fazem uso da mecânica quântica como ciência fundamental para desenvolver aparatos tecnológicos para suprir as diferentes necessidades da sociedade.

Como já foi mencionado a mecânica quântica está intimamente ligada com as novas tecnologias. Portanto, o ensino de física quântica pretende dar cidadania ao aluno para que este, não faça parte do grupo de analfabetos científicos. A forma pela qual pretendemos alcançar a aprendizagem significativa do corpo discente é o ensino de mecânica quântica através do experimento da dupla fenda. Iniciar a física quântica com a análise deste experimento não é algo inédito no ensino de física. Contudo, apenas os livros textos da graduação são privilegiados com esta sequência didática. No contexto do ensino médio, a sequência quase que uniforme nos livros textos são (GASPAR, 2007; CALÇADA, SAMPAIO, 2000; BÔAS *et. al.*, 2010; HALLIDAY *et. al.*, 2007; LIMA, MIOTO, 2007): *i*) Radiação do corpo negro (Planck); *ii*) Lei de Wien; *iii*) Lei de Stefan-Boltzman; *iv*) Efeito fotoelétrico; *v*) Efeito Compton; *vi*) Átomo de Bohr; *vii*) Dualidade onda-partícula (de Broglie). A discussão desta pesquisa não é impor que o começo de física quântica seja com o comportamento dual do elétron que não pode ser explicado pela física clássica. Esta pesquisa destaca a importância correta da apresentação e do enfoque no comportamento ondulatório de partículas. Acreditamos que a dualidade onda-partícula do elétron é “porta de entrada” para a física quântica.

Esta pesquisa tem como objetivo central buscar integrar o comportamento quântico, que acontece na escala atômica, no contexto do ensino médio. Apresentando o comportamento dual, onda-partícula, do elétron, a interpretação probabilística e o princípio de incerteza, acreditamos que o aluno será capaz de compreender um grande número de fenômenos que acontece em escalas que não são do domínio da mecânica clássica quando, em contato com estes temas.

Espera-se verificar quais os conhecimentos que o corpo discente possui, antes do contato com o conteúdo de física quântica, ou seja, o que faz parte do senso comum sobre este tema. Além disso, pretendemos verificar se o aluno consegue distinguir, no final da

aplicação desta pesquisa, que as leis da física em escalas atômicas são diferentes das leis da física clássica.

1.3 Objetivos

Sendo assim, estabelecemos os seguintes objetivos:

- Propor um material didático, utilizando experimentos virtuais, para que os estudantes possam ser submetidos ao experimento da dupla fenda, que quando realizado com elétrons, nos revela o principal mistério da mecânica quântica (FEYNMAN *et. al.*, 2008);
- Incentivar o uso de recursos tecnológicos, como o experimento virtual, no ensino de física;
- Propor uma forma de trabalhar o formalismo matemático da mecânica quântica da forma mais simples possível;
- Discutir as duas principais linhas de interpretação da mecânica quântica: interpretação realista e interpretação de Copenhague;

1.4 Estrutura da Dissertação

1. Na *Introdução*, conduzimos o leitor aos objetivos da pesquisa, materiais utilizados, sujeitos investigados e na importância do tema no ensino de física;
2. A *Fundamentação Teórica* é dividida de forma a apresentar o experimento da dupla fenda com partículas clássicas, ondas clássicas e objetos quânticos;
3. O *Experimento da dupla fenda com partículas* é o único analisado de forma intuitiva, sem o recurso do experimento virtual. Iniciamos a discussão da importância da probabilidade na física nesta seção. No final é aplicado um questionário estruturado sobre a atividade;
4. Já o *Experimento da dupla fenda com ondas* é o totalmente discutido com laboratórios virtuais. Ao final é aplicado um questionário no qual pretendemos que o estudante consiga obter o padrão de franjas de interferência;
5. Na seção sobre o *Experimento da dupla fenda com objetos quânticos*, iniciamos com o questionário. Utilizamos um novo experimento virtual e mostramos o resultado do experimento. Nesta fase, mostramos que o observador pode influenciar no resultado da medida;

6. Encerramos a fundamentação teórica com a discussão sobre duas *Interpretações da mecânica quântica*. Nesta seção convergimos a discussão para o princípio da complementariedade;
7. Continuando a discussão sobre experimento da fenda dupla com elétrons, discutimos de forma básica a *Formulação matemática da mecânica quântica*. Esta seção mostra que toda dificuldade que encontramos ao tentar analisar o experimento não aparece na estrutura formal da teoria;
8. No terceiro capítulo, discutimos a Metodologia para o uso do experimento virtual. Neste capítulo discutimos as vantagens e desvantagens do uso de atividades experimentais simuladas;
9. Propomos ainda neste capítulo, técnicas e procedimentos para escolher e aplicar atividades experimentais virtuais no ensino de física;
10. O sétimo capítulo é dedicado a discussão dos *Resultados* da aplicação dos questionários, experimentos virtuais e a apostila que elaboramos;
11. Neste último capítulo mostramos as respostas esperadas dos questionários do capítulo 2, 3 e 4.

Capítulo 2

Experimento da Dupla Fenda com Partículas

Como referencial teórico escolhemos os livros: *Lições de Física de Feynman: Mecânica Quântica* de (FEYNMAN *et. al.*, 2008) e *Conceitos de Física Quântica – volume 1* de Osvaldo Pessoa Jr. (PESSOA Jr, 2003). O livro de Feynman e colaboradores é base teórica principal apontada neste trabalho. Já o livro de Pessoa Jr. (2003) fecha a discussão aprofundando ainda mais o mistério sobre a mecânica quântica com as diferentes interpretações e as escolas de pensamentos. Entendemos que o experimento da dupla fenda com elétrons contém todos os elementos necessários para explicar as características da mecânica quântica. Feynman¹ sintetiza a importância deste experimento a seguir:

Selecionamos o fenômeno que é impossível, *absolutamente* impossível, de explicar em qualquer maneira tradicional e que tem a mecânica quântica em seu âmago. Na verdade, ele contém o *único* mistério. Não fazemos o mistério desaparecer ao “explicar” como ele funciona. Vamos simplesmente *dizer* como ele funciona. Ao dizer como ele atua, teremos falado sobre a peculiaridade básica de toda a mecânica quântica. (FEYNMAN *et. al.*, 2008, p.1-1).

Existem trabalhos que tratam deste mesmo assunto utilizando experimentos mentais (SORENSEN, 1979; GEORGIU, 2005; KIORANIUS, 2009). Nós optamos no uso de experimentos virtuais devido a acessibilidade e facilidade de manipulação de tal ferramenta (FERREIRA, SOUZA FILHO; 2015). Segundo Feynman *et. al.*, 2008 e colaboradores “*Nós sabemos como as coisas grandes se comportam, mas numa escala pequena elas não se comportam dessa forma. Então precisamos aprender sobre elas de uma forma abstrata ou imaginativa e não por analogia com nossa experiência direta*”. Esta asserção causa

¹A numeração do livro *Lições de Física de Feynman* não possui uma estrutura de numeração tradicional. Cada capítulo possui uma numeração com o número do capítulo acompanhado de um traço e o número da página. A cada novo capítulo a contagem da página se inicia. Por exemplo, a página 3⁵ é a quinta página do terceiro capítulo 3, mas esta página não é a quinta página do livro.

profunda limitação no sentido de transposição didática² sobre a física quântica. Surgem questionamentos como: Qual exemplo possuo como recurso para explicar no ensino médio o comportamento quântico das partículas? Qual sequência didática é a mais ideal no sentido do ensino de mecânica quântica? E por fim, o questionamento que aparenta ser incoerente, mas é uma realidade: Porque ensinar mecânica quântica no ensino médio? A estas questões, este trabalho pretende responder, de forma convincente, a importância de tal assunto no ensino médio.

De forma sintética respondemos as questões anteriores que encontrarão uma resposta completa no decorrer deste trabalho. A primeira pergunta denota a limitação que a mecânica quântica impõe a todos: os fenômenos não podem ser observados de forma direta. Portanto, um exemplo, como um experimento, ou uma analogia com algo do cotidiano, não é factível de realização. Sendo assim, como já foi destacado por Feynman e colaboradores, não adianta tentar realizar analogias. O que se pode fazer é ensinar os postulados de forma abstrata e mostrar aos estudantes que esta ciência é profundamente importante para a tecnologia atual, além de ser o assunto mais bem sucedido da física.³

Para a segunda questão, este trabalho propõe, um caminho para o ensino de mecânica quântica no ensino médio, que entendemos possa compor a ordem de assuntos mais próximo do ideal para se ensinar física quântica. Entretanto, não há um consenso de qual a sequência de assuntos seja ideal para ensinar física quântica⁴. Sendo assim, a sequência ao final deste trabalho é uma proposta.

A terceira questão é uma realidade no ensino de física proposto nos livros didáticos, ou seja, a mecânica quântica, quando tratada, é de forma superficial, salvo algumas raras exceções. No ano passado, 2014, a escolha do livro didático de física ocorreu em âmbito nacional (BRASIL, 2014). Foram enviadas quatorze coleções com três volumes para escolas através do Programa Nacional do Livro Didático PNLD (BRASIL, 2014)⁵. Não há dúvidas que o ensino de física não se restringe apenas a estes materiais. Dispomos de artigos, livros e revistas científicas. Entretanto, o que realmente chega as escolas públicas são livros didáticos do PNLD (BRASIL, 2014) e/ou apostilas elaboradas pela Secretária de Educação do Estado de São Paulo SEE/SP. Assim como os outros materiais citados, este trabalho é mais uma forma de melhorar o ensino de física.

Mas ainda não respondemos a terceira questão. Compreendemos que o ensino de mecânica quântica é essencial à sociedade atual. Graças ao desenvolvimento da física

²Não aprofundaremos este trabalho no sentido de expor as dificuldades sobre transposição didática da mecânica quântica.

³A eletrodinâmica quântica é o ramo da física que surgiu devido a junção da mecânica quântica com a relatividade restrita, denominado teoria quântica de campos. Atualmente, a eletrodinâmica quântica é o assunto mais exato da física, isto é, possui precisão de até dez casas decimais. Como este assunto é uma consequência da mecânica quântica, a mesma ostenta o patamar de ramo mais bem-sucedido da física.

⁴Referimo-nos aqui aos livros textos para a graduação.

⁵As afirmações que realizamos durante este texto sobre materiais didáticos referem-se a estas coleções e as apostilas do governo do Estado de São Paulo.

moderna, principalmente da física quântica, temos a eletrônica e a informática. Apenas estes dois argumentos sobre amplos desenvolvimentos tecnológicos já seriam suficientes para justificar o ensino de mecânica quântica, ou seja, argumentar que a eletrônica e a informática são consequências diretas deste ramo da física, é afirmar que muito das tecnologias de telecomunicação e os aparelhos tecnológicos que já se tornaram indispensáveis para o nosso bem estar, e até mesmo para manutenção da qualidade de vida, são consequências desta ciência. Além destas características, não podemos esquecer que corpos, objetos, sistemas e até nós, seres humanos, somos compostos de átomos, que a bem da facilidade de explicação, estes são compostos de: prótons, nêutrons e elétrons. Este último é nosso objeto de estudo neste trabalho. Mas o comportamento do elétron, quando não observado, é totalmente diferente de qualquer objeto macroscópico que seja submetido ao experimento da dupla fenda, e somos constituídos destas partículas.

Compreendemos que propor uma abordagem diferente de um dado conteúdo no ensino médio ou até mesmo o acréscimo de algum assunto parece ser audacioso. Os materiais didáticos que nos referimos no parágrafo anterior deixam a desejar no assunto que tratamos aqui. Não podemos criticar os autores destes livros e apostilas, pois é bem sabido que tanto o governo quanto as editoras impõem restrições de páginas e assuntos. Contudo, fica a questão, até quando deixaremos de ensinar o assunto mais bem-sucedido da física? Este trabalho vem auxiliar, como muitos outros (CAVALCANTE, TAVOLARO, 2002; PINTO, ZANETIC, 1999; GASPAR, 2007), a carência de textos que tratam sobre a mecânica quântica no ensino médio de forma mais profunda.

Iniciaremos este trabalho utilizando a sequência proposta por Feynman *et. al.*, 2008 e amplamente desenvolvida na literatura (DICKE, WITTKKE, 1961; COHEN-TANNOUDJI *et. al.*, 1977; GASIOROWICZ, 1979; LOPES, 1992; MERZBACHER, 1997; PESSOA Jr., 2003; NUSSENZVEIG, 2008; MAHON, 2011). Inicialmente propomos um experimento mental com partículas num dado arranjo que será conveniente nas próximas seções. Não há experimento virtual⁶ que reproduza a situação descrita nas próximas subseções. Entretanto, o experimento com partículas é de fácil compreensão e o resultado esperado não contrasta com o senso comum, isto é, acreditamos que com facilidade, a maioria dos alunos conseguirão concluir o resultado certo, sem dificuldades.⁷

Na próxima seção exporemos o questionário de levantamento do conhecimento prévio dos estudantes. Portanto, as próximas seções os diálogos estabelecidos através do questionário são entre professor e aluno. O questionário desta seção não tem objetivo de mensurar algum grau de conhecimento do aluno, mas sim, ao final da aplicação deste trabalho, verificar se houve alguma mudança no pensamento sobre as leis da física e suas

⁶Durante a aplicação deste trabalho um grupo de alunos desenvolveu um experimento virtual que reproduz o experimento da dupla fenda com partículas clássicas. Mostramos o referido experimento no capítulo sobre resultados.

⁷Durante a aplicação deste trabalho o assunto que os alunos mais tiveram dificuldades foi justamente a seção de partículas clássicas. Ver capítulo 7 sobre resultados.

limitações.

Seguindo as subseções dedicamos um espaço para discutir o experimento com partículas quando atravessam uma fenda e posteriormente com duas fendas. Em ambas seções mostramos os gráficos de probabilidade do resultado final da experiência que pode ser concebido utilizando a teoria de probabilidades (IEZZI, HAZZAN, 1985; LIMA *et. al.*, 2006). Alertamos que as discussões nas subseções posteriores ao questionário, respondem o mesmo, tal qual, com o objetivo de afirmar os resultados que os estudantes encontraram ou de mostrar qual o raciocínio deveria ter sido utilizado.

2.1 Partículas em Experimentos com Uma e Duas Fendas

A situação exposta a seguir é retirada do livro *Lições de Física de Feynman: Mecânica Quântica* de Feynman *et. al.*, (2008), onde é proposto um arranjo experimental com projéteis de uma metralhadora,

Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai “absorver” os projéteis que ao atingirem. (FEYNMAN *et. al.*, 2008, p.1-1, p.1-2).

Pode-se propor para os alunos a construam de uma figura inicial explicando o que foi imaginado na leitura deste trecho. Uma resposta que normalmente acontece é desenhar os orifícios como “furos” na parede. A solicitação desta figura possui dois objetivos distintos que cabe ao professor mediar e escolher qual o caminho é mais ideal para determinada sala.

A primeira proposta é sobre a imagem construída pelos estudantes seja livre, sem nenhuma restrição. Esta escolha, permite analisar com mais precisão o grau de abstração do aluno sobre o assunto que se inicia pois não impõem regras, ou seja, o resultado com esta proposta permite fazer suposições sobre futuras dificuldades e, conseqüentemente, o docente pode preparar estratégias para superar esta hipotética situação. Já a segunda proposta restringe a abstração do aluno sobre o assunto, mas o benefício encontra-se em estabelecer condições iniciais que conduzam a imaginação mais rapidamente na resposta desejada. Por exemplo: *i*) solicitar que a figura tenha fendas; *ii*) Reproduzir a figura em perspectiva, isto é, como se a imagem estivesse esboçada sobre um plano tridimensional. Enfim, esta etapa depende do docente e seu corpo discente.

A figura a seguir representa em perspectiva o arranjo experimental proposto por Feynman *et. al.*, (2008). Destacamos que a Figura 2.1 pode ser reproduzida com inúmeras variações. O que necessita ser preservado é a ordem do arranjo, isto é, metralhadora, parede com orifícios ou fendas, e o anteparo.

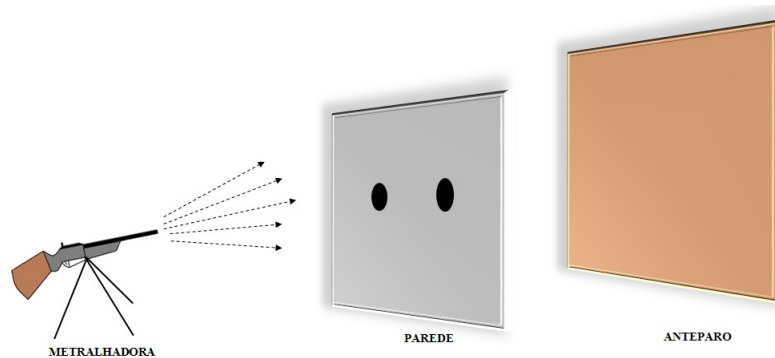


Figura 2.1: Experimento de Feynman e colaboradores com projéteis sem o detector de partículas (visão em perspectiva).

Este arranjo está incompleto, pois não possui o detector de projéteis que, neste caso específico, permite determinar a probabilidade de um dado projétil ser encontrado em uma região da parede, como Feynman⁸ *et. al.*, (2008) explica:

Na frente da parede temos um objeto que vamos chamar de um “detector” de projéteis, que poderia ser uma caixa de areia. Qualquer projétil que entrar no detector será parado e acumulado. Quando quisermos podemos esvaziar a caixa e contar o número de projéteis que foram capturados. O detector pode se mover para frente e para trás (no que vamos chamar de direção x). (FEYNMAN *et. al.*, 2008, p.1-2).

É importante enfatizar que o arranjo permite medir a probabilidade de encontrar o projétil na parede. Sendo assim, por mais que o experimento apresente uma construção clássica e seja avaliado de tal forma, o conceito de probabilidade começa a ser inserido nesta etapa. Einstein e colaboradores (EINSTEIN, INFELD; 2008) em A Evolução da Física, explicam como surge a análise probabilística em alguns casos da física usando um exemplo de partículas que se movem em um gás,

Caso se tentasse, então, aplicar os métodos conhecidos da mecânica clássica para calcular as posições finais das partículas, as dificuldades seriam insuperáveis. Em princípio, é possível usar o método empregado para o movimento dos planetas, mas, na prática, ele é inútil, devendo ceder lugar ao *método estatístico*. Esse método dispensa qualquer conhecimento exato dos estados iniciais. (EINSTEIN; INFELD, 2008, p.233).

⁸Para frente e para trás... denota o sentido de movimento da caixa na figura que aparece no livro de Feynman *et. al.*, 2008. Uma figura similar há referência citada seria a Figura 2.2 com a seguinte mudança: uma rotação de 90° no sentido direito do plano da página deste trabalho.

Para justificar o uso da probabilidade em alguns assuntos da física e qual a sua real funcionalidade, Einstein e Infeld (EINSTEIN, INFELD; 2008) continuam o discurso relatando que:

Não nos preocupamos com indivíduos. O que buscamos determinar são os valores médios representativos do agregado inteiro. Está claro que só poderia haver um propósito em um método de raciocínio estatístico quando o sistema consiste de grande número de indivíduos. Aplicando o método estatístico, não podemos prever o comportamento de um indivíduo em uma multidão, podemos apenas prever a possibilidade, a *probabilidade*, de que ele se comporte de algum modo particular. (EINSTEIN; INFELD, 2008, p.233).

Retornando ao experimento com projéteis proposto por Feynman e colaboradores, o caráter probabilístico é notadamente importante para entender como encontrar o resultado final para este distinto arranjo experimental. Continuando a exposição deste experimento, Feynman também enfatiza de forma definitiva a importância da probabilidade,

Primeiro, você deve perceber que devemos falar de probabilidade, porque não podemos definitivamente dizer aonde um determinado projétil irá. Um projétil que atinja um orifício e por acaso acerte sua beirada pode ser refletido e ir parar em algum lugar qualquer. Por “probabilidade” queremos dizer a chance que um projétil tem de chegar no detector e que podemos medir e contar o número que chega num certo intervalo de tempo como uma fração do número *total* que atinge o anteparo durante esse mesmo tempo. Ou, se assumimos que a metralhadora atira com uma taxa uniforme durante a medição, então a probabilidade que queremos é apenas proporcional ao número de projéteis que chega no medidor num certo intervalo de tempo padrão. (FEYNMAN *et al.*, 2008, p.1-1,1-2).

Portanto, após a explicação do experimento, a reprodução da imagem que os alunos produziram (com ou sem restrições), deve-se explicar o caráter probabilístico deste aparato experimental. Enfatizando a fala anterior de Feynman e colaboradores sobre o que pode de fato ocorrer com os projéteis.

É necessário destacar as seguintes condições idealizadas para a realização adequada do experimento: *i*) As balas são indestrutíveis, ou seja, sempre chegam ao detector ⁹ inteiras e nunca uma fração de projétil; *ii*) Todos os projéteis tem a mesma velocidade e a mesma energia; *iii*) A metralhadora produz uma rajada de disparos lenta, de tal forma que seja possível a cada disparo verificar se chegou ao detector um projétil, ou não, devido ao fato do projétil ter seu movimento bloqueado na parede blindada. Estas três considerações nos permitem constatar que nunca chegará, por exemplo, dois projéteis ao mesmo tempo na caixa de areia e, quando chega algo no detector tem que ser uma bala inteira, ou seja,

⁹O detector móvel pode ser uma caixa de areia que pode se mover no eixo x .

nunca encontraremos na caixa de areia pedaços do projétil. Esta afirmação pode parecer simples e desnecessária. Entretanto, quando formos utilizar a luz no experimento da dupla fenda, será necessário revisar e contrastar estas assertivas com os resultados encontrados entre fótons e projéteis de uma metralhadora.

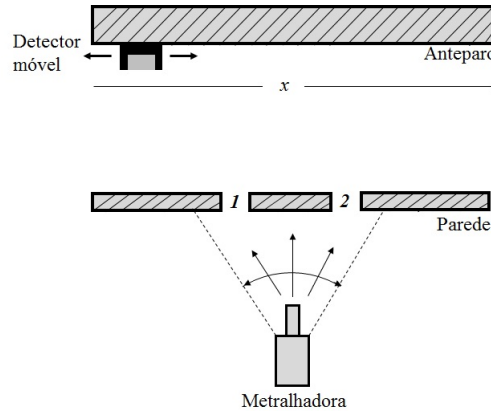


Figura 2.2: Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis (nesta figura aparece o detector de partículas).

Mostramos a parte da figura¹⁰ que aparece no livro¹¹ *Lições de Física de Feynman: Mecânica Quântica* de Feynman *et. al.*, (2008), esta figura é uma reprodução da original e não conta com a segunda parte que mostram os gráficos de probabilidades de chegada dos projéteis quando orifício 2 está fechado e um segundo gráfico sobreposto com o orifício 1 fechado.

Enfatizamos que nesta etapa ainda não expomos a Figura 2.2 devido a aspectos didáticos. Neste momento estamos coletando quais conhecimentos prévios os alunos possuem, ou utilizam, quando submetidos a analisar o arranjo experimental da dupla fenda com partículas clássicas.

2.2 Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda

Texto de Apoio

O cientista norte americano Feynman e colaboradores propôs em uma aula de física na década de 60 o seguinte experimento mental: “Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com

¹⁰A espessura da parede deve ser da mesma ordem de grandeza do projétil.

¹¹A figura a seguir aparece no livro de Feynman *et. al.*, (2008) sobre uma rotação de 90° para a direita quando comparada a nossa figura.

uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai “absorver” os projéteis que a atingirem”

Questão 1 - No quadro abaixo reproduza através de uma figura o experimento proposto por Feynman e colaboradores: Observe a imagem a seguir que mostra o experimento da dupla fenda numa visão superior:

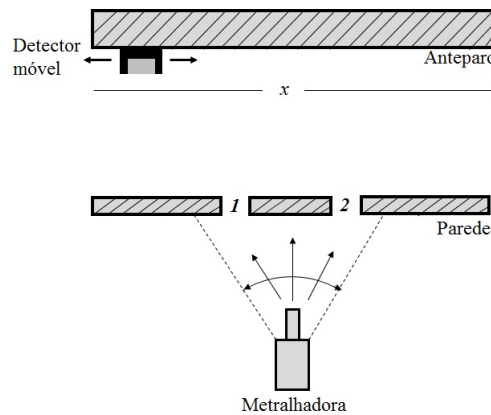


Figura 2.3: Questão 1 do questionário 1

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo com uma visão frontal no quadro quadriculado de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima no quadro quadriculado. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de baixo para cima no quadro quadriculado e não especificamente na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 - Antes do início do experimento cobrimos a fenda cuja sombra é R de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, **pinte** na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.

Questão 3 - Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda S de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, **pinte** na figura abaixo qual será o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.

Questão 4 - Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem de projéteis. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos projéteis, **pinte** na figura abaixo qual será o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.

Questão 5 - Caso seja trocado projéteis por bolas de gude, o resultado do experimento mental sofreria alguma mudança?

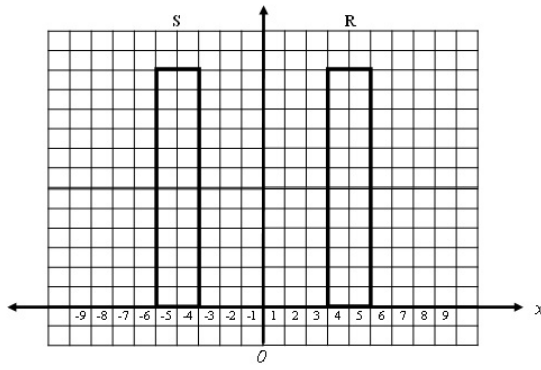


Figura 2.4: Questão 2 do questionário 1

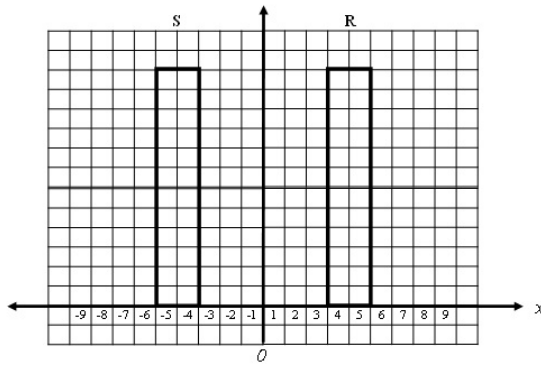


Figura 2.5: Questão 3 do questionário 1

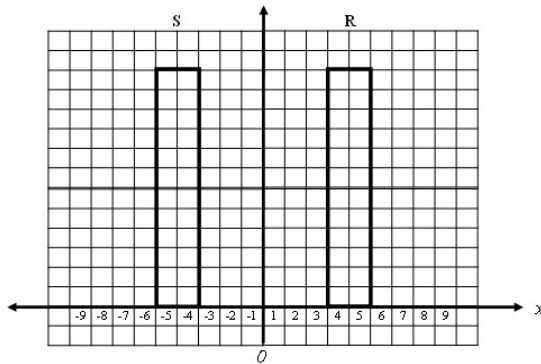


Figura 2.6: Questão 4 do questionário 1

Questão 6 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

2.3 Explicação do Experimento da Dupla Fenda com Partículas Clássicas

Levando em consideração as três condições idealizadas na seção 2.1, pode-se perguntar, depois de um período de tempo de realização do experimento, qual a probabilidade em função da distância x de um projétil, que passou pelas fendas, chegar no anteparo (Figura 2.7a) quando: *i*) a fenda 2 está coberta e a fenda 1 está aberta? (Figura 2.7b) *ii*) a fenda 1 está coberta e a fenda 2 está aberta? (Figura 2.7c) e *iii*) as duas fendas estão abertas? (Figura 2.7d). A resposta aparece na Figura 2.7¹², que ilustra as possibilidades descritas anteriormente:

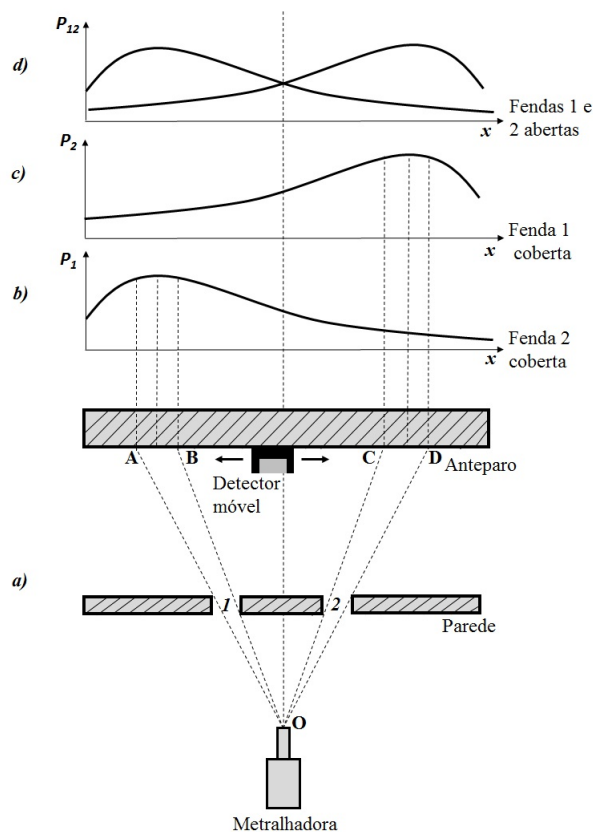


Figura 2.7: Experimento da dupla fenda com partículas.

O triângulo AOB revela a região com maior densidade de projéteis que atravessa a fenda 1 e chega no anteparo sobre o segmento AB . Conseqüentemente a região contida no segmento AB possui maior probabilidade de chegada de projéteis. Conforme a caixa de areia se move sobre o eixo x , durante a realização do experimento, percebe-se que poucos projéteis que atravessaram a fenda 1 foram encontrados na extremidade oposta e distante

¹²a) mostra o aparato experimental. b) a probabilidade $P_1(x)$ quando a fenda 1 está aberta e a fenda 2 está coberta. c) a probabilidade $P_2(x)$ quando a fenda 1 está coberta e a fenda 2 está aberta. d) a probabilidade $P_{12}(x)$ quando a fenda 1 e a fenda 2 estão abertas.

do segmento AB . Isto se deve ao fato de existir uma pequena probabilidade das balas ricochetear em na fenda 1 e, conseqüentemente, serem encontradas em qualquer ponto do eixo x . Contudo, a probabilidade de encontrar projéteis fora da região compreendida pelo segmento AB diminui exponencialmente devido ao fato destes eventos serem esporádicos. Após está análise, podemos intuir o gráfico de probabilidade P_1 que é uma curva com seu máximo na projeção da ponta da metralhadora até o anteparo passando pela fenda 1 na parede, ou seja, segmento AB .

Quando a fenda 1 é fechada e a fenda 2 é aberta, a análise é semelhante a que acabamos de realizar para encontrar o resultado para a probabilidade P_2 . O resultado na Figura 2.7c mostra o gráfico de probabilidade P_2 que é simétrico a curva P_1 mas com seu máximo na linha reta entre a metralhadora e o orifício 2, isto é, o segmento CD . O triângulo COD mostra a região na qual há maior densidade de projéteis, que atravessam a fenda 2 e chegam no anteparo sobre o segmento CD , quando a fenda 1 está fechada.

Quando as duas fendas estão abertas, temos o gráfico de P_{12} , mostrado na Figura 2d, que é a combinação das curvas P_1 e P_2 . Na literatura, normalmente (FEYNMAN *et. al.*, 2008; LOPES, 1992) este resultado é ampliado como na Figura 2.8 devido às finalidades didáticas que residem na demonstração de que:

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x) \tag{2.1}$$

O resultado na expressão (2.1) mostra que a combinação das curvas $P_1(x)$ e $P_2(x)$ sig-

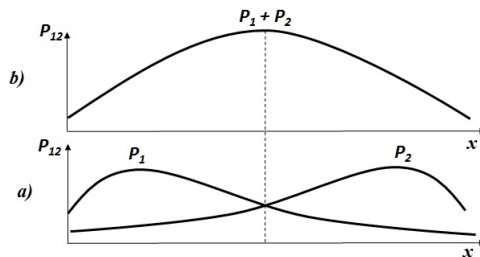


Figura 2.8: Probabilidades com as duas fendas abertas. a) probabilidades P_1 e P_2 separadamente. b) a soma de $P_1 + P_2$

nifica a simples soma das probabilidades para cada orifício aberto separadamente. Caso o objetivo fosse encontrar o resultado mostrado na expressão (2.1), sem necessidade de conhecer os gráficos de $P_1(x)$ e $P_2(x)$, poderíamos realizar a seguinte análise: como as balas ou atravessam a fenda 1 (que denominaremos *evento A*) ou atravessam a fenda 2 (que denominaremos *evento B*), segundo o teorema da probabilidade da união de dois eventos (IEZZI e HAZZAN, 1985; LIMA *et. al.*, 2006) mutuamente excludentes $A \cap B = \emptyset$, isto

é, os eventos A e B não ocorrem simultaneamente¹³ temos:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (2.2)$$

o resultado na expressão 2.2 pode ser entendido da seguinte forma: se dois eventos A e B são mutuamente excludentes, isso significa que não existe a probabilidade deles ocorrerem ao mesmo tempo (é impossível que um único projétil atravessasse as fendas 1 e 2 ao mesmo tempo. Como a metralhadora é lenta, apenas uma bala é disparada por vez). Sendo assim, a intersecção entre os eventos A e B nunca pode ocorrer, isto é, $A \cap B = \emptyset$. Como ocorre apenas o evento A (atravessar a fenda 1) ou o evento B (atravessar a fenda 2), simbolicamente, podemos escrever $P(A \cup B)$. Esta probabilidade pode ser reescrita como a probabilidade de ocorrer o evento A mas não ocorrer o evento B , isto é, $P(A - B)$, ou ocorrer o evento B , $P(B)$:

$$P(A \cup B) = P[(A - B) \cup P(B)] \quad (2.3)$$

como $A - B$ e B são mutuamente excludentes, podemos separar numa soma de probabilidades:

$$P(A \cup B) = P(A - B) + P(B) \quad (2.4)$$

a probabilidade $A - B$ pode ser reescrita como a probabilidade de ocorrer apenas o evento A , $P(A)$, menos a probabilidade de ocorrer o evento A simultaneamente ao evento B , ou seja, $P(A \cap B)$, desta forma:

$$P(A - B) = P(A) - P(A \cap B) \quad (2.5)$$

substituindo a expressão (2.5) na expressão (2.4) e rearranjando os termos, teremos

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (2.6)$$

entretanto, a probabilidade $P(A \cap B) = 0$, o que faz a expressão (2.6) se reduzir a expressão (2.2), $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$. Que substituindo as letras que representam os eventos, pelo número que representa a fenda que o projétil atravessou, isto é, fazendo $P(A) = P_1(x)$, $P(B) = P_2(x)$ e $P(A \cup B) = P_{12}(x)$ o resultado se reduz a expressão (2.1) encontrada quando intuimos os gráficos de probabilidade.

A Figura 2.7 mostra um gráfico com curvas de probabilidades contínuas que representam o resultado de experimento realizado com partículas clássicas, isto é, um experimento

¹³O termo simultaneidade usado neste contexto refere-se a teoria de probabilidades e restringe-se apenas a dois eventos ocorrendo ao mesmo tempo. Diferentemente do princípio da simultaneidade da relatividade especial.

discreto. Este fato pode causar problemas caso não seja identificado que o resultado é discreto, mas a representação foi feita por uma linha contínua de densidade de probabilidade, ou seja, o resultado discreto do experimento pode ser confundido devido a representação escolhida. Esta asserção que realizamos evidencia o porquê de escolhermos um quadro quadriculado e impormos a regra de pintar quadrado por quadrado. O resultado não será uma linha contínua. A linha contínua é uma aproximação do resultado.

Capítulo 3

Experimento da Dupla Fenda com Ondas Clássicas

Antes de iniciarmos esta seção destacamos que a ordem da aplicação dos capítulos 2 e 3 pode ser invertida, isto é, pode-se inicialmente apresentar o experimento da dupla fenda com ondas e em seguida o experimento da fenda dupla com partículas. Esta opção de ordem de assuntos, com ondas clássicas primeiro e, posteriormente partículas clássicas, aparece em Nussenzveig (1998). A ordem deste trabalho é o mesmo seguido por Feynman *et. al.*, (2008). Nesta seção trabalharemos com o experimento da dupla fenda com ondas. Inicialmente expomos a superposição de ondas e as condições de interferência construtiva e destrutiva. Neste momento, usamos o primeiro experimento virtual denominado *Onda em Corda* disponível no sítio eletrônico do PHET¹ para mostrar visualmente, de forma dinâmica, o benefício que o uso da atividade experimental simulada proporciona (FERREIRA, SOUZA FILHO; 2015), a superposição de ondas em uma corda. Em seguida, discutimos o princípio de Huygens e a difração de ondas de água para uma fenda. Propomos a aplicação do questionário nesta etapa. Após esta etapa, utilizaremos o segundo experimento virtual denominado *Interferência de Ondas* que também está disponível no PHET com o objetivo de mostrar como surge franjas de interferência. O caminho seguido por Feynman *et. al.*, (2008) em *Lições de Física de Feynman: Mecânica Quântica* é uma experiência com ondas de água, que possui um arranjo experimental similar ao construído no experimento com partículas clássicas. Apresentaremos a versão de Feynman no formulário desta seção.

3.1 Interferência de Ondas Unidimensionais

Inicialmente discutimos a interferência de ondas unidimensionais. Para tanto, de forma simplificada Calçada e Sampaio (2001) define:

¹Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/. Acessado em 05 de outubro de 2015.

Quando duas (ou mais) ondas atingem simultaneamente um dado ponto de um meio no qual se propagam, esse ponto sofre um efeito resultante da “soma” dos efeitos que cada onda produziria isoladamente no ponto. A esse fenômeno dá-se o nome de *interferência*. A interferência é um fenômeno localizado, ficando restrito ao local onde ocorre a superposição das ondas. Vale o denominado *princípio da independência das ondas*: nos demais pontos do meio em que não há superposição, os efeitos produzidos por uma onda ocorrem como se a outra não existisse. (CALÇADA; SAMPAIO, 2001, p.416-17)

Para mostrar a interferência unidimensional de ondas utilizamos o experimento virtual denominado *Onda em Corda*. A figura a seguir mostra a imagem de abertura do referido aplicativo.

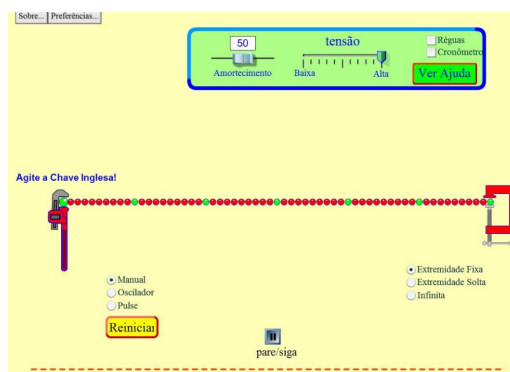


Figura 3.1: Experimento virtual Onda em corda. Visão de abertura do experimento antes do início da atividade. (Retirado do PHET e adaptado pelo autor)

As discussões metodológicas para uso do experimento virtual estão no capítulo 6 deste trabalho. Neste mesmo capítulo tentamos responder aos questionamentos sobre as limitações desta ferramenta, impacto no ensino com este recurso e a viabilidade da atividade experimental simulada. Por enquanto faremos uso da mesma sem uma prévia defesa de suas potencialidades. Entretanto, no decorrer desta seção, as funcionalidades do uso de atividades experimentais simuladas em aulas de física, se evidenciaram paulatinamente.

Quando apresentado o experimental virtual, sem nenhum receio, pode-se solicitar aos alunos que explorem seus recursos. No caso específico do recorrente aplicativo, ele se inicia com uma dica de uso “*Agite a Chave Inglesa!*”. Aparece neste momento as primeiras qualidades do experimento virtual, ele não quebra, é rápido, não consome material e pode ser reiniciado a qualquer momento, ou de onde parou, ou desde o seu início como se nada tivesse interagido com a experiência estudada.

Nosso objetivo é mostrar interferência unidimensional de uma onda. Para tanto, reduziremos o experimento a uma situação ideal. Pode causar estranheza de início estabelecer condições ideais ao experimento virtual, afinal, por ser uma atividade experimental simulada não é o objetivo principal simular experiências ideais? Na verdade está resposta não é

trivial. Cada experimento virtual possui uma finalidade. Apenas explorando o aplicativo saberemos com qual objetivo o mesmo foi construído. Entretanto, o experimento virtual pode sim ser utilizado para experiências que não podem ser realizadas na bancada de um laboratório.

Por estabelecer as condições ideais entendemos diminuir o amortecimento a um valor nulo no botão *amortecimento* do aplicativo. Gerando um pulso, na função *pulse*, temos três condições que poderão provocar ou não o retorno do pulso: *i*) Extremidade Fixa; *ii*) Extremidade Solta; e *iii*) Infinita. As duas primeiras possibilidades retornam o pulso para sua origem com a seguinte distinção: na extremidade fixa o pulso retorna invertido devido a colisão com a parede. Já na extremidade solta o pulso retorna com a mesma orientação que foi gerado. A terceira opção o pulso não retorna por não haver nenhum meio refletor.

A primeira situação que pretendemos demonstrar é a *interferência construtiva de ondas*. Para tanto, além de reduzir o amortecimento a zero, alteramos o valor da amplitude para o valor máximo, isto é, 100. Escolhemos a extremidade solta e geramos o primeiro pulso. Usamos a função *pare* para interromper o experimento e provocarmos o segundo pulso, entretanto com amplitude 50. Continuamos o experimento solicitando a função *siga*. A Figura 3.2² mostra o resultado destas condições iniciais solicitadas no *Onda em Corda*.

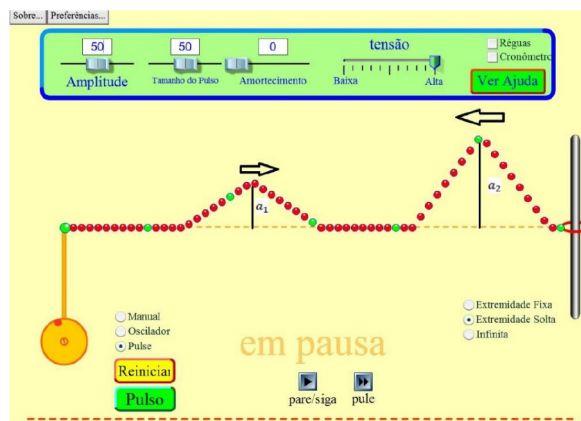


Figura 3.2: Experimento virtual Onda em corda

Observe que a amplitude não possui unidade. Sendo assim, é necessário que façamos esta inserção. Graças a função *réguas* podemos medir o tamanho do pulso. Quando esta função é solicitada aparecem duas réguas, uma na vertical outra na horizontal, como mostrado na Figura 3.3. Podemos assim medir o valor de a_1 da Figura 3.2. Uma limitação deste aplicativo é não possuir a opção de inserir sucessivas réguas.

²Dois pulsos a_1 e a_2 são mostrados na figura com suas respectivas orientações (as setas de orientação do movimento do pulso e as representações das amplitudes por a_1 e a_2 são nossas).

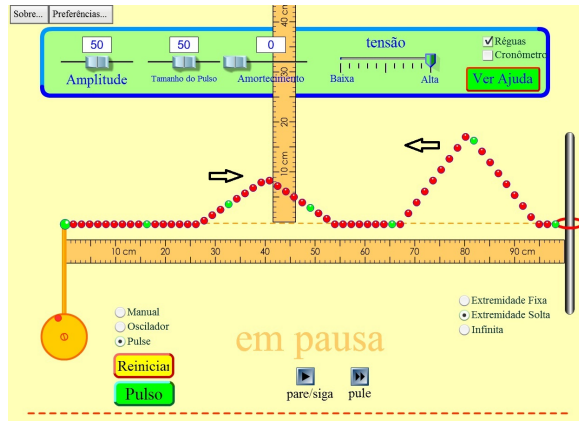


Figura 3.3: Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da esquerda é aproximadamente 9 cm (as setas de orientação são nossas).

Para o referencial das medidas de amplitudes, consideramos que o traçado amarelado é o início da amplitude da onda e a parte superior da bolinha é o fim desta amplitude. Este sistema de referência será adotado durante toda esta seção. Temos que a medida da amplitude do pulso da esquerda na Figura 3.3 corresponde a aproximadamente 9 cm. Caso houvesse a opção de inserir uma segunda régua, poderíamos medir simultaneamente o pulso da direita e o pulso da esquerda. Diante desta limitação elaboramos a Figura 3.3 que mostra a medida da amplitude do pulso da esquerda. Como este laboratório virtual disponibiliza a possibilidade de mover a régua com o experimento em pausa, apenas carregamos a régua da Figura 3.3 para o pulso da direita e medimos sua amplitude, como mostrado na Figura 3.4.

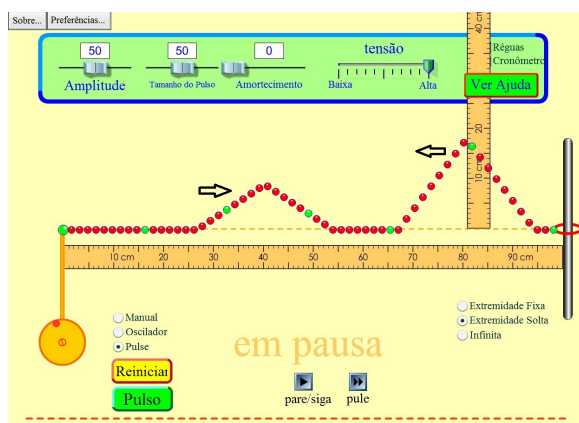


Figura 3.4: Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da direita é aproximadamente 18 cm (setas de orientação são nossas).

Através da Figura 3.4 podemos observar que o pulso da direita possui medida de

amplitude aproximadamente 18 cm. Sendo assim temos os seguintes dados:

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 9\text{cm} \\ a_2 &\approx 18\text{cm} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Calçada e Sampaio (2001) afirma que observaremos no momento da interferência a “soma” dos efeitos que cada onda produziria isoladamente. Portanto, espera-se que encontremos uma onda com amplitude de 27 cm, pois

$$a = a_1 + a_2 \approx 9\text{cm} + 18\text{cm} = 27\text{cm} \quad (3.2)$$

munidos destas informações podemos verificar o que acontece na superposição dos dois pulsos que aparecem na Figura 3.5. Aproximadamente, encontramos um valor próximo de 27 cm. Demonstrando a seguinte relação nas situações que ocorrem *interferência construtiva*

$$a = a_1 + a_2 \quad (3.3)$$

onde a grandeza a é denominada *amplitude resultante*. Mostramos assim, como pode-se chegar a uma relação matemática entre as amplitudes utilizando o recurso de atividade experimental simulada.

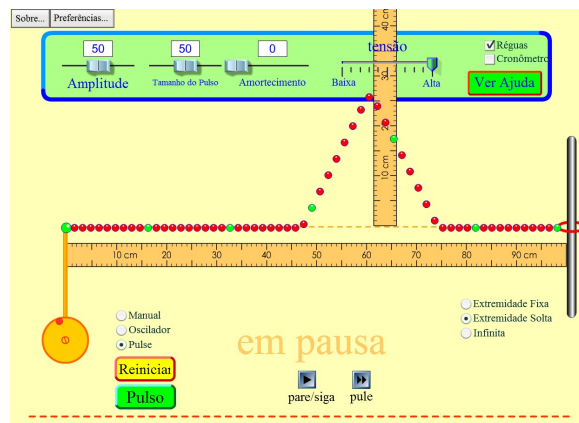


Figura 3.5: Experimento virtual Onda em corda. Superposição dos dois pulsos. O valor da amplitude resultante é aproximadamente 27 cm.

Para finalizar a discussão sobre interferência construtiva, mostramos o que ocorre com os dois pulsos na Figura 3.6 depois da interferência na Figura 3.5.

A discussão para *interferência destrutiva* é similar com o que foi discutido na *interferência construtiva*. Sendo assim, faremos as seguintes atividades: *i*) produziremos dois pulsos invertidos e mediremos suas amplitudes antes da superposição (Figuras 3.7 e 3.8); *ii*) mediremos a amplitude resultante na figura de interferência (Figura 3.9) e; *iii*)

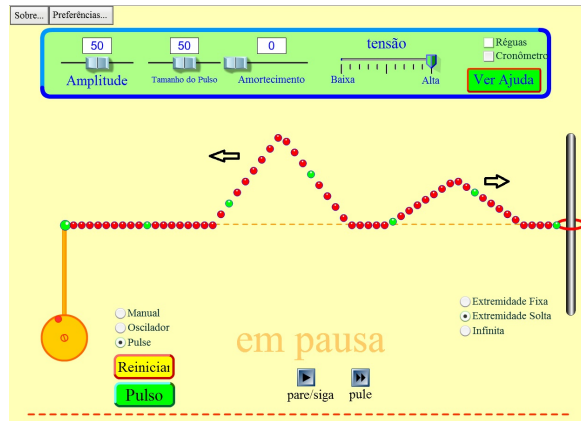


Figura 3.6: Após a interferência os dois pulsos retornam suas características iniciais como se nada houvesse ocorrido (as setas de orientação do movimento do pulso são nossas).

verificaremos se as características iniciais são recuperadas após o instante que ocorreu a superposição das ondas (Figura 3.10). Realizada estas etapas analisaremos um caso especial de interferência destrutiva para amplitudes iguais.

Para iniciar o experimento e verificarmos a *interferência destrutiva* definimos novamente as condições na atividade experimental simulada *Onda em Corda*: *i*) reduzir o amortecimento a zero; *ii*) alterar o valor da amplitude para o valor máximo, isto é, 100. Escolhemos a extremidade solta e provocamos o primeiro pulso. Diferente do que foi feito na interferência construtiva, esperamos o primeiro pulso retornar refletir com a base do oscilador e se transformar em um pulso invertido; *iii*) utilizamos a função *pare* novamente para interromper o experimento e provocarmos o segundo pulso, entretanto com amplitude 50. Após realizada estas etapas produzimos as Figuras 3.7 e 3.8 que possuem as réguas graduadas em centímetros para medirmos a amplitude nesta escala para cada pulso. A Figura 3.8 ainda conta com as grandezas a_1 e a_2 indicadas para distinguirmos as amplitudes do pulso da esquerda e da direita antes da superposição.

Através das Figuras 3.7 e 3.8 obtemos os valores aproximados das amplitudes dos dois pulsos no experimento da interferência destrutiva. Obtemos os seguintes dados

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 18\text{cm} \\ a_2 &\approx 9\text{cm} \end{aligned} \tag{3.4}$$

É importante ressaltar que o termo “*soma*” de efeitos nesta etapa revela-se como a subtração das amplitudes. Isto deve-se ao fato de que um pulso está invertido em relação ao outro. A superposição das ondas diminuirá a amplitude da onda resultante e este valor respeitará a seguinte condição:

$$a_1 > a \geq a_1 \tag{3.5}$$

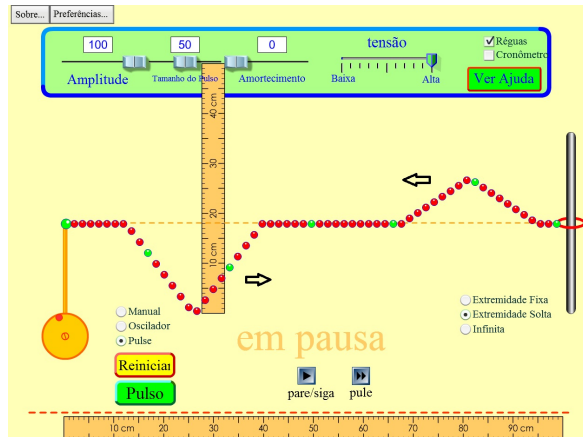


Figura 3.7: Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da esquerda é aproximadamente 18 cm (setas de orientação nossas).

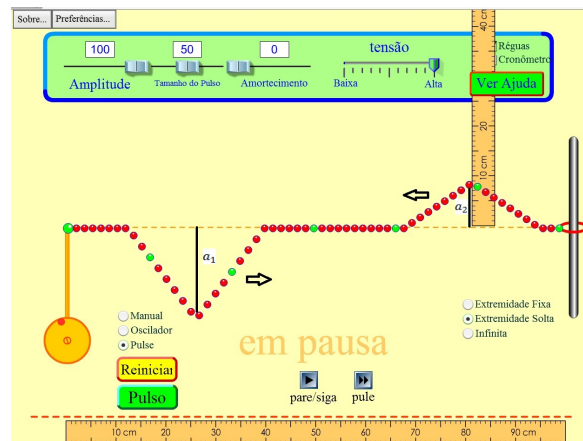


Figura 3.8: Experimento virtual Onda em corda. O valor da amplitude do pulso da direita é aproximadamente 9 cm (as setas de orientação do movimento do pulso e as representações das amplitudes por a_1 e a_2 são nossas).

Esperamos que o valor da amplitude da onda resultante seja aproximadamente 9 cm. Portanto, espera-se que encontremos uma onda com amplitude de 27 cm, pois:

$$a = a_1 - a_2 \approx 18\text{cm} - 9\text{cm} = 9\text{cm} \quad (3.6)$$

Enfim, podemos verificar o que acontece na superposição dos dois pulsos que é mostrado na Figura 3.9. Aproximadamente, encontramos o valor de amplitude igual a 9 cm. Este valor é aproximadamente o mesmo obtido por nossas suposições. Desta forma mostramos a seguinte relação nas situações que ocorrem *interferência destrutiva*

$$a = a_1 - a_2 \quad (3.7)$$

Onde a grandeza a é novamente denominada *amplitude resultante*. Mostramos assim, as duas relações de interferência unidimensionais. Para finalizar a discussão sobre inter-

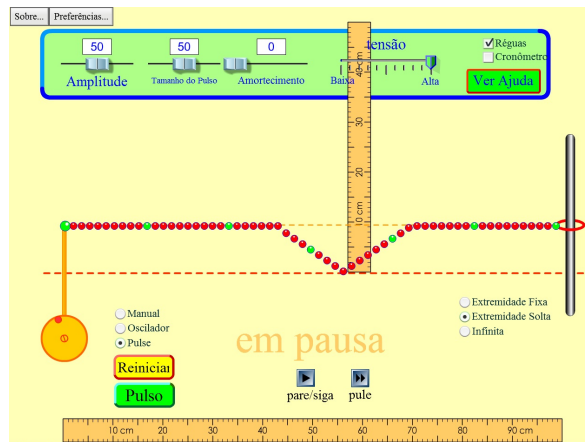


Figura 3.9: Experimento virtual Onda em corda. Superposição dos dois pulsos. O valor da amplitude resultante é aproximadamente 9 cm.

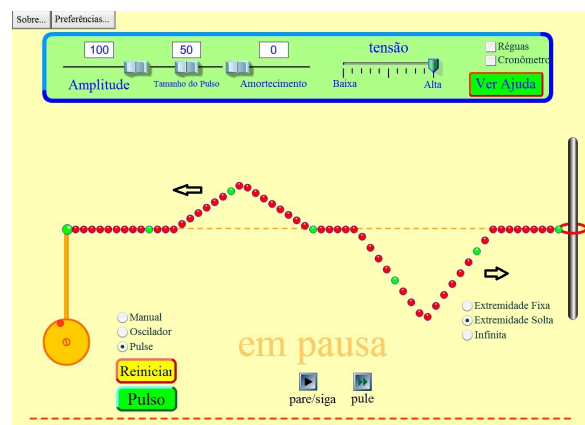


Figura 3.10: Experimento virtual Onda em Corda. Após a interferência os dois pulsos retornam suas características iniciais como se nada houvesse ocorrido (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).

ferência destrutiva, mostramos o que ocorre com os dois pulsos na Figura 3.10, depois da interferência na Figura 3.9. Antes de analisarmos o último tópico da discussão sobre interferência de ondas unidimensionais, discutimos uma limitação do experimento virtual *Onda em Corda*. Realizamos sucessivas medidas de amplitudes de ondas para várias posições diferentes dos pulsos provocados pelo oscilador. Ao final de tantas medidas, preservar as condições iniciais estabelecidas no referencial de mensuração de amplitudes, isto é, o *traçado amarelado é o início da amplitude da onda e a parte superior da bolinha é o fim desta amplitude*, torna-se quase que inviável. Quando solicitada a ferramenta *Ver Ajuda* deste aplicativo, aparecerá uma linha de referência móvel, como mostrado na

Figura 3.11. Mesmo com esta ferramenta não podemos abandonar o termo aproximado para cada medida de amplitude que é realizada. Duas possíveis soluções seriam:

- Com plano de fundo do aplicativo uma grade fixa graduada ou;
- Um vetor que medisse a amplitude a qualquer instante.

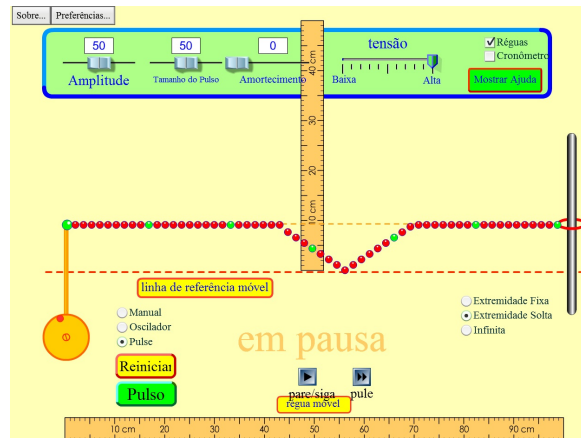


Figura 3.11: Experimento virtual Onda em Corda. Mostra a linha de referência móvel.

Destacamos ainda dois pontos. Primeiro, a limitação referida não inviabiliza o aplicativo. Pelo contrário, sem grandes dificuldades pode ser mostrado as relações de interferência de ondas unidimensionais como acabamos de fazer. Segundo, este experimento virtual pode ser utilizado para outros fins como: perda de energia devido ao amortecimento, medidas de frequência com a função *Cronômetro* e, o importante estudo do movimento harmônico simples.

O último ponto de interesse sobre interferência de ondas unidimensionais neste trabalho é quando temos dois pulsos invertidos com amplitudes iguais. Esta situação é mostrada na Figura 3.12. Pela relação que encontramos anteriormente para interferência destrutiva e sabendo que $a_1 = a_2$, temos:

$$a = a_1 - a_2 = 0 \quad (3.8)$$

Quando a medida da amplitude resultante é nula, temos a denominada interferência destrutiva total Calçada e Sampaio (2001). Para produzir este tipo de interferência, estabelecemos as seguintes condições iniciais no experimento virtual Onda em Corda: *i*) reduzir o amortecimento a zero; *ii*) manter o valor da amplitude em 50; *iii*) escolher a extremidade solta. Neste momento provocamos o primeiro pulso e esperamos que ele mude para um pulso invertido após o contato com o oscilador; *iv*) utilizamos a função *pare* para interromper o experimento e provocamos o segundo pulso, com a mesma amplitude 50. O momento da superposição das ondas é mostrado na Figura 3.13.

A Figura 3.14 evidencia o princípio da independência das ondas, isto é, os pulsos recuperam as características que possuíam antes da superposição. A interferência destrutiva

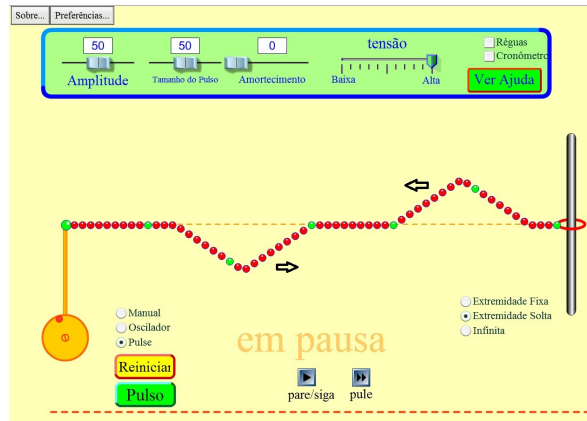


Figura 3.12: Experimento virtual Onda em Corda. Os dois pulsos invertidos possuem amplitudes iguais (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).

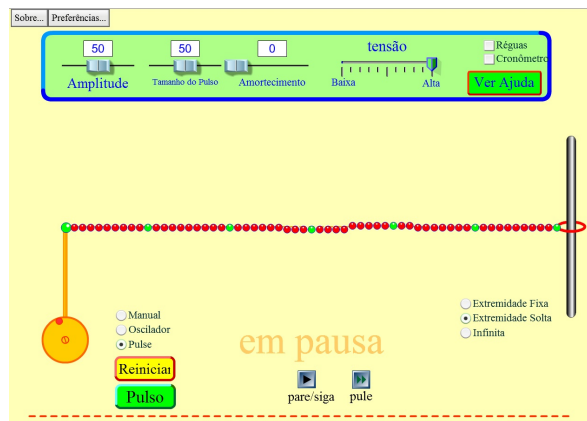


Figura 3.13: Experimento virtual Onda em Corda. Quando ocorre interferência destrutiva total é destruído todos os efeitos que onda produziria.

total será útil nas discussões que se referem a interferência com ondas na dupla fenda.

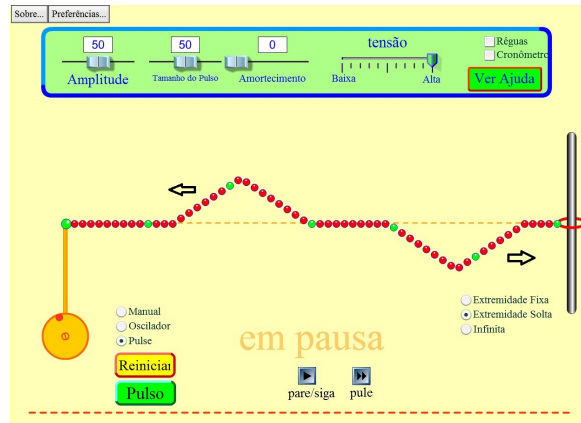


Figura 3.14: Experimento virtual Onda em Corda. Os dois pulsos recuperam suas características anteriores a superposição (as setas de orientação do movimento dos pulsos são nossas).

3.2 Difração de Ondas

Quando um trem de ondas retas de comprimento de onda λ encontra uma barreira com um orifício, desde que este orifício seja da mesma ordem de grandeza de λ , as ondas se “encurvam”. Este fenômeno que é mostrado na Figura 3.15 é denominado *difração*.

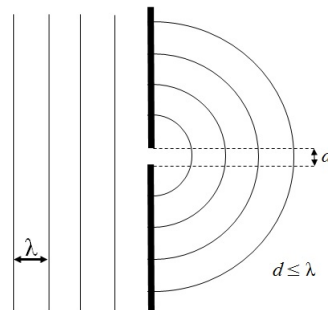


Figura 3.15: Efeito da Difração em um trem de ondas retas. O tamanho do orifício deve ser menor ou igual ao comprimento de onda do trem de ondas.

Para explicar o fenômeno da difração, partimos do princípio de Huygens segundo Calçada e Sampaio (2001):

Cada ponto de uma frente de onda comporta-se como fonte de “pequenas” ondas secundárias, que se propagam em todas as direções, com velocidade igual à da onda principal. Após um intervalo de tempo Δt , a nova posição da frente de onda é a envoltória das frentes das ondas secundárias. Por “envoltória das frentes das ondas secundárias” entende-se a superfície que tangencia as frentes de ondas secundárias (CALÇADA; SAMPAIO, 2001, p.409).

Para entender o princípio de Huygens observemos a Figura 3.16 que mostra uma frente de ondas S que se propaga num dado instante. Para descobrir a posição da frente de onda S depois de um curto intervalo de tempo, Calçada e Sampaio (2001) propõem:

[...] S é a frente de onda no instante t , para uma onda que se propaga com velocidade v . Para obter a posição S' da frente de onda no instante $t' = t + \Delta t$, consideramos cada ponto de S como um emissor de onda secundárias. Supondo que o meio seja homogêneo e isotrópico, a velocidade de propagação será a mesma em todas as direções. Assim, no instante t' , as frentes de ondas secundárias serão circunferências (ou superfícies esféricas), de raio $r = v \cdot \Delta t$. A frente de onda S' , no instante t' , é a superfície (ou linha) que tangencia todas as frentes de onda secundárias (CALÇADA; SAMPAIO, 2001, p.409).

A Figura 3.16 sintetiza a asserção de Calçada

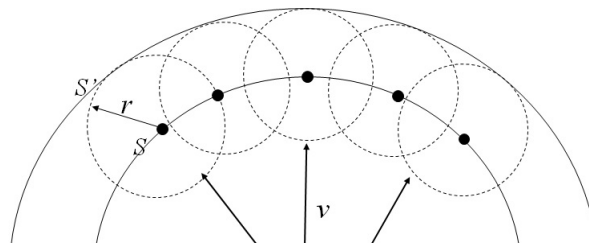


Figura 3.16: Efeito da Difração em um trem de ondas retas que atravessou um orifício. O tamanho do orifício deve ser menor ou igual ao comprimento de onda do trem de ondas.

No experimento proposto por Feynman *et. al.* (2008) com ondas de água atravessando duas fendas, as ondas sofrem difração nas fendas e, quando encontram o absorvedor (termo que Feynman utiliza para uma parede que não reflete as ondas de água) temos um padrão de franjas de interferência no detector. Optamos por não apresentarmos de forma direta e objetiva este resultado que não é trivial, com a finalidade do aluno investigar a resposta a um dado experimento “novo” que propomos na próxima seção.

Apresentamos agora a definição de difração segundo Bôas *et. al.* (2010) e colaboradores sobre o efeito de difração,

Chama-se **difração** de uma onda o encurvamento sofrido por seus raios quando a onda encontra obstáculos à sua propagação. O fenômeno de difração prova ser incorreta a generalização de que os raios de onda são retilíneos (ainda que em meios homogêneos e isótopos) (Bôas *et. al.*, 2010, p.226).

Tendo em vista o término desta seção, realizamos a segunda observação: Os textos referenciados nesta seção são de livros de física para o ensino médio. Caso este projeto seja aplicado em um curso de graduação, sugerimos que esta etapa seja realizada de forma

direta com a apresentação do experimento de ondas luminosas de Young.

3.3 Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda

Antes de prosseguirmos, revisamos a seguinte nomenclatura para ondas que aparece na Figura 3.17. Tal denominação será útil na aplicação deste questionário

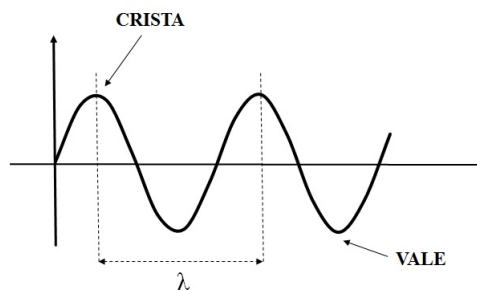


Figura 3.17: Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ .

Na Figura 3.17, λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser entendido facilmente como a distância entre dois vales ou a distância entre duas cristas. Entretanto, a distância entre dois pontos na onda, que tenha completado um ciclo, equivale a λ .

Questão 1 Nas figuras a seguir determine qual o tipo de interferência e qual o valor da amplitude resultante em função da amplitude a_1 para cada situação

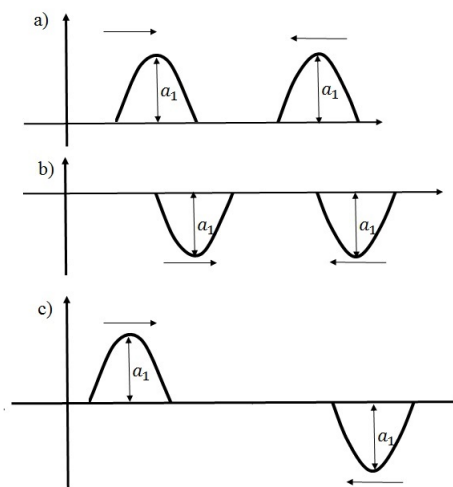


Figura 3.18: Questão 1 do questionário 2

Texto de Apoio

Feynman sugere que pensemos agora em uma experiência com ondas de água: “Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita da fonte temos de novo uma parede com dois orifícios e mais adiante está a segunda parede, que para manter as coisas simples, é um “absorvedor”, de forma que não há reflexão das ondas que chegam nele. Isso pode ser feito construindo um tanque onde o nível de água gradualmente diminui. Na frente do absorvedor colocamos o detector que pode ser movimentado para cima e para baixo na direção x , como antes. O detector é agora um dispositivo que mede a “intensidade” do movimento ondulatório. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatório, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao *quadrado* da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à *energia* sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector”.

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo com uma visão frontal no quadro quadriculado de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (intensidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima no quadro quadriculado. Por exemplo, se na posição -8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de baixo para cima no quadro quadriculado e não especificamente na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 - Antes do início do experimento cobrimos a fenda R de forma que por esta fenda, nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, **pinte** na figura abaixo, qual será o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.

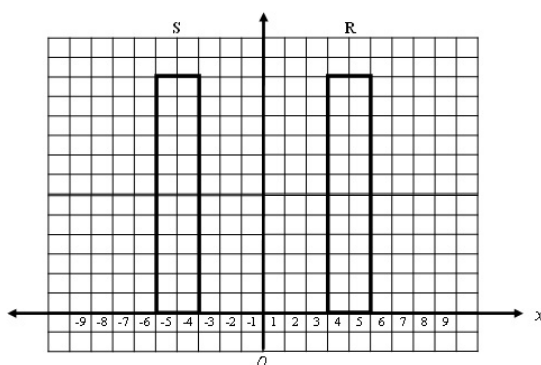


Figura 3.19: Questão 2 do questionário 2

Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda S de forma que por esta fenda nenhuma onda possa passar. Sabendo

que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, **pinte** na figura abaixo, qual será o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.

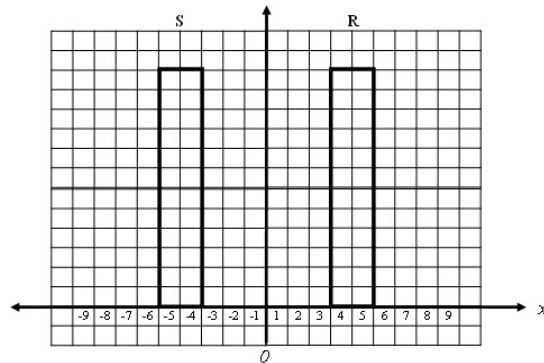


Figura 3.20: Questão 3 do questionário 2

Questão 4 – Como no questionário sobre partículas, o experimento proposto por Feynman pode ser representado de forma simples, como a seguir:

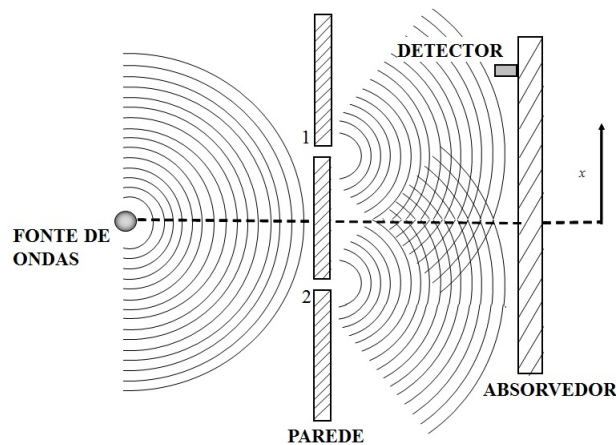


Figura 3.21: Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.

Observe que tanto na fenda 1 quanto na fenda 2 as ondas sofrem o efeito de difração. Considere que as duas ondas difratadas, nas fendas 1 e 2, possuam a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda. Na Figura 3.21, utilizaremos a seguinte representação que será adotada para responder a *Questão 4* que aparece na Figura 3.22: cristas são representadas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas.

Na Figura 3.23 pinte as bolinhas que representem *interferência construtiva*. O encontro de duas ondas que provoquem uma *interferência destrutiva* não precisa ser pintado. Se a interferência for *construtiva* existe um dado valor de intensidade que diminui conforme o

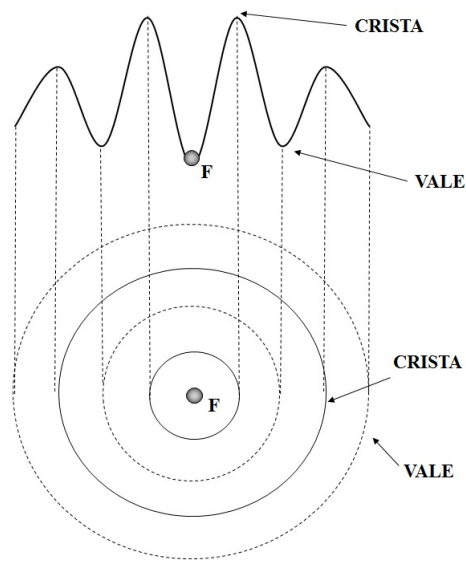


Figura 3.22: Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).

gráfico se afasta do centro. Se a interferência for *destrutiva total*, o valor de intensidade é nulo. Definido todos os pontos do gráfico, plote o gráfico da onda que representa este fenômeno.

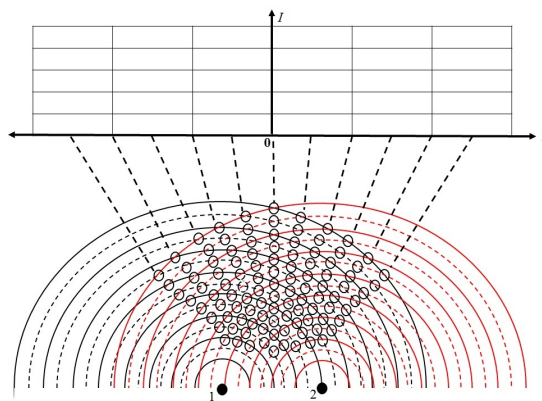


Figura 3.23: Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).

3.4 Análise Matemática das Intensidades

A intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude, à velocidade da onda e ao quadrado da frequência. No caso do experimento da dupla fenda as frequências das ondas difratadas nas fendas 1 e 2 são iguais (devido ao fato da frente de onda que chegam nas fendas 1 e 2 terem sido excitadas pela mesma fonte de ondas e as fendas são equidistantes e com mesmo diâmetro). Sendo assim podemos dizer que $I(x) = |y(x, t)|^2$, onde $y(x, t)$ é uma equação de onda do tipo $y(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \delta)$, onde: A é a amplitude da onda, k é o número de onda, ω é a frequência angular e δ é uma constante de fase. A equação de onda pode ser escrita em notação complexa tomando-se sua parte real:

$$y(x, t) = \text{Re} [Ae^{i(kx - \omega t + \delta)}] \quad (3.9)$$

lembrando as fórmulas de Euler³:

$$\begin{aligned} e^{i\theta} &= \cos \theta + i \cdot \text{sen} \theta \\ e^{-i\theta} &= \cos \theta - i \cdot \text{sen} \theta \end{aligned} \quad (3.10)$$

fazendo $\beta = kx - \omega t + \delta$ e comparando com as formulas de Euler podemos retornar na equação de onda:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \text{Re} [Ae^{i\beta}] = \text{Re} [A \cdot (\cos \beta + i \cdot \text{sen} \beta)] \\ &= A \cos \beta = A \cos(kx - \omega t + \delta) \end{aligned} \quad (3.11)$$

como a frequência não muda podemos reescrever a expressão 3.9 para as ondas difratadas na fenda 1, $y_1(x, t)$ e na fenda 2 $y_2(x, t)$:

$$\begin{aligned} y_1(x, t) &= \text{Re} [h_1 e^{i(\varphi_1 - \omega t)}] \\ y_2(x, t) &= \text{Re} [h_2 e^{i(\varphi_2 - \omega t)}] \end{aligned} \quad (3.12)$$

no lugar da amplitude colocamos a altura da onda e realizamos as seguintes substituições:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= kx + \delta_1 \\ \varphi_2 &= kx + \delta_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

³Tradicionalmente não se usa o número de Euler no ensino médio. Entretanto, esta abordagem não é tão incomum como mostra Lima *et. al.* (2001)

retornando ao fato de que $I(x) = |y(x, t)|^2$ e lembrando que as duas fendas estão abertas, como foi mostrado na seção 3, quando duas ondas se encontram (superposição de ondas) podem ocorrer ou interferência construtiva ou interferência destrutiva. Para analisarmos esta situação matematicamente devemos somar algebricamente suas amplitudes, isto é, somar as expressões em 3.12:

$$I_{12}(x) = \left| |h_1| e^{i\varphi_1} e^{-i\omega t} + |h_2| e^{i\varphi_2} e^{-i\omega t} \right|^2 = \left| |h_1| e^{i\varphi_1} + |h_2| e^{i\varphi_2} \right|^2 \underbrace{|e^{-i\omega t}|^2}_1 \quad (3.14)$$

na expressão 3.14 separamos o argumento de cada número e complexo e utilizamos o fato de que um número complexo multiplicado pelo seu complexo conjugado é um número real. Daí temos que: $|e^{-i\omega t}|^2 = e^{-i\omega t} e^{i\omega t} = e^0 = 1$. A expressão 3.14 fica:

$$\begin{aligned} I_{12}(x) &= (|h_1| e^{-i\varphi_1} + |h_2| e^{-i\varphi_2}) \cdot (|h_1| e^{i\varphi_1} + |h_2| e^{i\varphi_2}) \\ &= |h_1|^2 \underbrace{e^{-i\varphi_1} e^{i\varphi_1}}_1 + |h_1| |h_2| e^{i\varphi_2} e^{-i\varphi_1} + |h_1| |h_2| e^{-i\varphi_2} e^{i\varphi_1} + |h_2|^2 \underbrace{e^{-i\varphi_2} e^{i\varphi_2}}_1 \\ &= |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_1| |h_2| e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + |h_1| |h_2| e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)} \\ &= |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_1| |h_2| [e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)}] \end{aligned} \quad (3.15)$$

utilizando as formulas de Euler 3.10 no último membro da expressão 3.15, temos:

$$e^{i\delta} + e^{-i\delta} = \cos \delta + i \cdot \text{sen} \delta + \cos \delta - i \cdot \text{sen} \delta = 2 \cos \delta \quad (3.16)$$

om a substituição $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$, a expressão 3.15 fica:

$$I_{12}(x) = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2 |h_1| |h_2| \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (3.17)$$

o termo $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$ é denominado *diferença de fase* entre as ondas difratadas nas fendas 1 e 2. Podemos escrever a equação 3.17 em termos apenas de intensidades recorrendo ao fato da proporcionalidade entre a intensidade e amplitude ao quadrado:

$$\begin{aligned} I_1(x) &= |h_1|^2 \\ I_2(x) &= |h_2|^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

substituindo 3.18 em 3.17 temos:

$$\begin{aligned} I_{12}(x) &= \underbrace{|h_1|^2}_{I_1(x)} + \underbrace{|h_2|^2}_{I_2(x)} + 2 \cdot \underbrace{|h_1| |h_2|}_{\sqrt{I_1(x) I_2(x)}} \cdot \cos \delta \\ &= I_1(x) + I_2(x) + 2 \sqrt{I_1(x) I_2(x)} \cos \delta \end{aligned} \quad (3.19)$$

Comparando o resultado na expressão 3.19 com o resultado da expressão (1), $P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x)$, pode-se constatar que a diferença, entre realizar o experimento da dupla fenda com partículas clássicas (projéteis) e realizar o experimento da dupla fenda com ondas clássicas (ondas de água) é o termo de interferência

$$2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos \delta \quad (3.20)$$

Se o termo de interferência 3.21 não existisse, as equações 2.1 e 3.13 seriam similares. A única diferença seria que para partículas estaria sendo medida a probabilidade em função de x enquanto para ondas a intensidade em função de x .

A expressão 3.19 justifica a forma da curva da Figura 4.3, no experimento com ondas, produzir interferência. Como o termo trigonométrico pode variar de $[-1, 1]$ a intensidade $I_{12}(x)$ pode assumir valores nulos (interferência destrutiva) e valores máximos (interferência construtiva). O termo de interferência provoca as oscilações mostradas na figura 4.3 e, como consequência temos uma curva muito diferente da mostrada para partículas na figura 2.8.

Capítulo 4

Experimento da Dupla Fenda com Objetos Quânticos

Diferentemente dos capítulos 2 e 3, onde foram realizadas introduções teóricas antes do questionário, nesta seção, aplicaremos o questionário logo no início. Inicialmente é realizada uma revisão dos experimentos com partículas e ondas e depois pergunta-se ao aluno qual a expectativa do resultado de um experimento similar (fonte – parede com dupla fenda – anteparo com detector) utilizando elétrons. A resposta que mostraremos após este questionário, é o objetivo central deste trabalho. Mostraremos o quão distinto é o comportamento de partículas subatômicas. Pretendemos satisfatoriamente explicar o que significa o termo *dualidade onda-partícula*. Após o questionário usaremos o experimento virtual *interferência quântica* e mostraremos o resultado do experimento da dupla fenda com elétrons.

Já discutimos algumas características que torna as atividades simuladas uma importante ferramenta experimental para o ensino de física. O experimento virtual que trabalharemos durante todo este capítulo possui ferramentas que fortalecerão nossos argumentos sobre a eficácia, a objetividade e rapidez das atividades experimentais simuladas.

4.1 Questionário 3 – Elétrons no Experimento da Dupla Fenda

Antes de iniciar o questionário propriamente dito, lembremos de algumas características relevantes dos experimentos da dupla fenda com partículas e com ondas. No experimento com projéteis tínhamos:

i) Os projéteis chegam em unidades no detector *ii)* De forma intuitiva medimos a probabilidade de chegada dos projéteis no detector e obtivemos o gráfico da Figura 4.1. Assim, a probabilidade de chegada quando as duas fendas estão abertas é soma das probabilidades de quando a fenda 2 está tampada e a fenda 1 está aberta, $P_1(x)$, com a

probabilidade de quando a fenda 1 está tampada e a fenda 2 está aberta, $P_2(x)$. Assim, obtemos o seguinte resultado, também mostrado na Figura 4.1:

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x) \quad (4.1)$$

No experimento da dupla fenda com ondas, concluímos alguns resultados importantes,

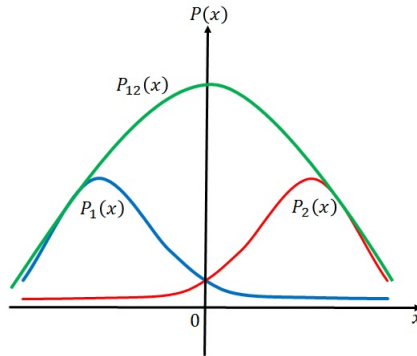


Figura 4.1: Gráfico de probabilidade com as duas fendas abertas.

sejam eles:

- i)* A intensidade da onda pode ter qualquer valor;
- ii)* Quando as duas fendas estão abertas, a intensidade das ondas está sujeita a interferência. Podemos resumir estes resultados da seguinte forma:

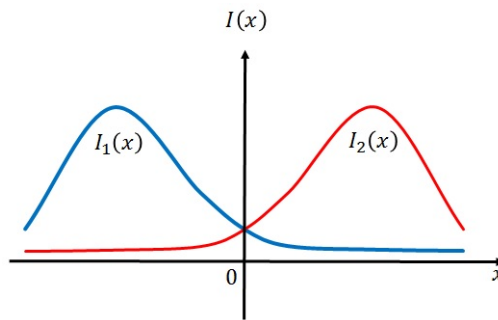


Figura 4.2: Gráfico de intensidade da onda. $I_1(x)$ é a intensidade quando a fenda 2 está coberta. $I_2(x)$ é a intensidade quando a fenda 1 está coberta.

Diferente das partículas, a intensidade $I_{12}(x)$ não é a soma das intensidades $I_1(x)$ e $I_2(x)$. Este resultado se deve ao fato das ondas apresentarem interferência como mostrado na Figura 4.3,

Para calcular a intensidade $I_{12}(x)$ precisamos lembrar da definição da intensidade

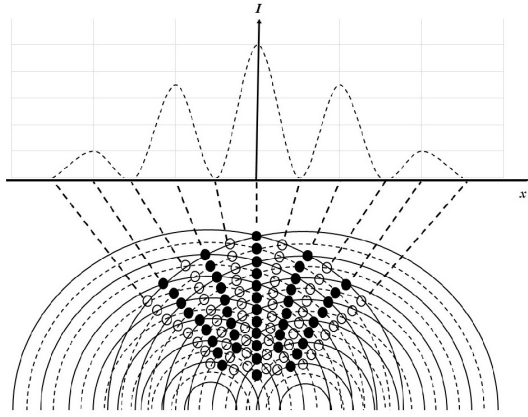


Figura 4.3: Gráfico de interferência de duas ondas difratadas no experimento de Feynman.

proposta por Feynman, isto é, a intensidade é igual a altura ao quadrado, assim:

$$\begin{aligned} I_1(x) &= |h_1|^2 \\ I_2(x) &= |h_2|^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Quando os dois orifícios estão abertos, a intensidade da onda é dada por:

$$I_{12}(x) = |h_1 + h_2|^2 \quad (4.3)$$

Pela lei dos cossenos, temos:

$$\begin{aligned} I_{12}(x) &= \underbrace{|h_1|^2}_{I_1(x)} + \underbrace{|h_2|^2}_{I_2(x)} + 2 \cdot \underbrace{|h_1| |h_2|}_{\sqrt{I_1(x)I_2(x)}} \cdot \cos \delta \\ &= I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos \delta \end{aligned} \quad (4.4)$$

Observe que a distinção entre o experimento com partículas e o experimento com ondas, é o termo de interferência

$$2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos \delta \quad (4.5)$$

Texto de Apoio

Feynman propõem finalmente o experimento da dupla fenda com elétrons: “Um canhão de elétrons, que consiste em um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado em uma caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação a caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão (essencialmente) a mesma energia. Na frente do canhão mais uma vez temos uma parede (fina de metal) com dois orifícios. Além da parede, está

outra placa que servirá como anteparo. Na frente do anteparo colocamos um detector móvel. O detector pode ser um contador Geiger ou, talvez, até melhor, uma multiplicadora de elétrons, que será conectada a um alto-falante ... A primeira coisa que notamos com a experiência é que ouvimos um clique sempre que um elétron atinge o detector (o alto-falante). E todos os cliques são iguais. *Não* existe “meio clique”.”

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo com uma visão frontal no quadro quadriculado de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima no quadro quadriculado. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de baixo para cima no quadro quadriculado e não especificamente na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 1 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda R de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, **pinte** na figura abaixo, qual será o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

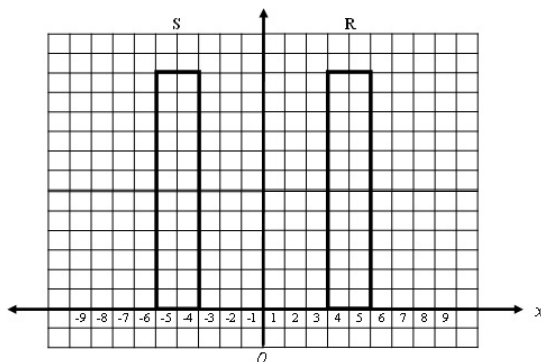


Figura 4.4: Questão 1 do questionário 3

Questão 2 – Da mesma forma que na *Questão 1*, antes do início do experimento cobrimos a fenda S de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, **pinte** na figura abaixo, qual será o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

Questão 3 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem dos elétrons. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, **pinte** na figura abaixo, qual será o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

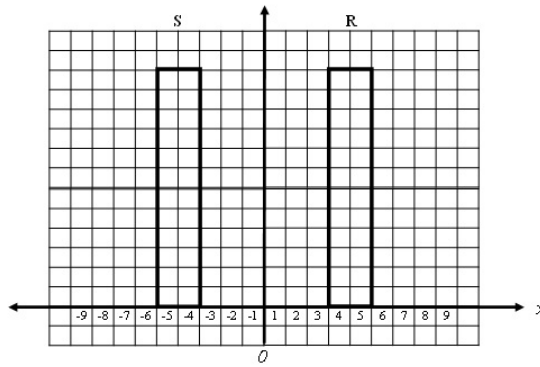


Figura 4.5: Questão 2 do questionário 3

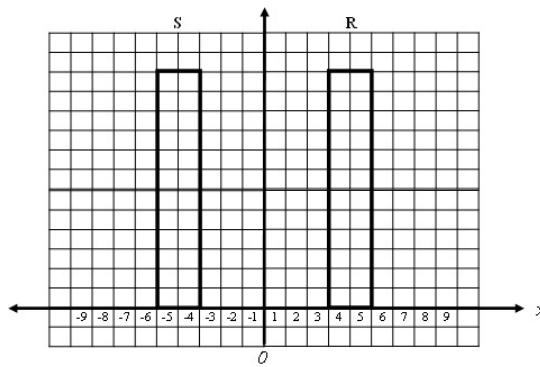


Figura 4.6: Questão 3 do questionário 3

4.2 Comportamento Quântico

Nesta seção utilizaremos dois experimentos virtuais disponíveis no site do PHET¹ para mostrar o comportamento quântico de fótons e elétrons. Para mostrar o comportamento quântico de fótons utilizamos a seguir o experimento *Interferência de Ondas*. A Figura 28 mostra a imagem do experimento já iniciado. Escolhemos utilizar no experimento uma “lâmpada” para poder analisar o comportamento da luz. Após a “lâmpada” ligada colocamos uma “barreira” com uma fenda. A possibilidade de escolher barreira com duas fendas no lado direito do experimento na parte inferior. Para analisar o que ocorre com os fótons quando chegam no final do percurso solicitamos a função “mostrar tela” que mostra os pontos com maior incidência de luz. Apenas após escolhida está função aparece uma nova função denominada “gráfico de intensidade” a qual selecionada gera o gráfico da Figura 4.7:

¹O experimento virtual Interferência quântica disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference. Acessado em 05 de novembro de 2015. O experimento virtual Interferência de Ondas Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference. Acessado em 05 de novembro de 2015.

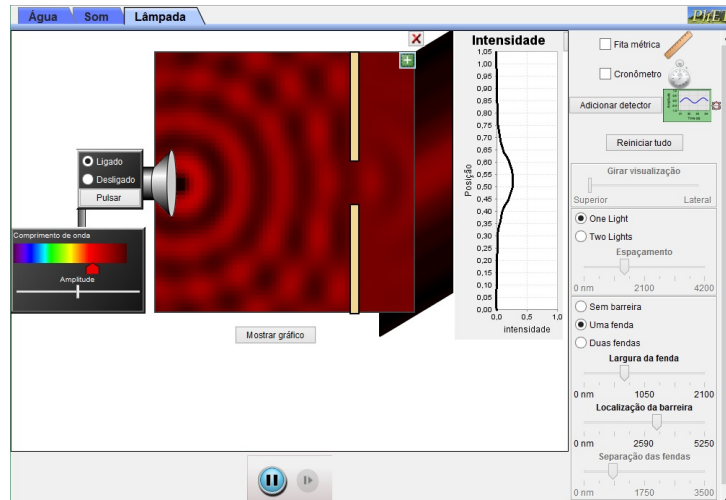


Figura 4.7: Experimento virtual Interferência de Ondas com uma fenda.

Com o objetivo de tornar a explanação a seguir mais clara, realizamos as seguintes modificações nas próximas figuras: 1º) rotacionamos a imagem 90º no sentido esquerdo; 2º) destacamos apenas as imagens da trajetória da luz, a tela e o gráfico de intensidade e 3º) rearranjamos os índices do gráfico de intensidade.

Realizamos estas alterações por questões didáticas. Primeiro: visualizar o gráfico de intensidade na horizontal, ou seja, como convencionalmente como é feito, colabora com a facilidade de visualização do resultado². Segundo: retiramos todas as informações laterais e inferiores para restringir esta discussão no resultado mostrado no gráfico de intensidade. Assim, a Figura 4.7 fica:

Podemos alterar o tamanho da fenda paulatinamente através da função “largura da fenda”. Também podemos utilizar a função “separação das fendas” para tentar mudar o resultado no gráfico de intensidade. Conforme modificamos o tamanho da fenda a luz na tela começa a sofrer interferência como mostrado na Figura 4.10.

Podemos assim verificar que o fóton que é uma partícula, pois sai em unidades do filamento da lâmpada *i*), chega em unidades na tela *ii*), mas se comporta como onda quando passa pelas fendas *iii*) como mostrado na Figura 4.9 que mostra que fótons sofrem difração nas fendas e, sofre interferência *iv*) quando chega na parede como mostrado na Figura 4.10.

A primeira *i*) e segunda *ii*) características destacadas são iguais as características de partículas clássicas. A terceira *iii*) e a quarta *iv*) características são iguais as características de ondas clássicas. O fóton não se comporta nem como partícula nem como onda, seu comportamento é o que denominamos comportamento quântico (FEYNMAN *et. al.*,

²Entendemos que o formato do gráfico na vertical não diminui a potencialidade do experimento. O gráfico surge de forma dinâmica. Caso sejam realizadas modificações nas fendas a intensidade muda paulatinamente.

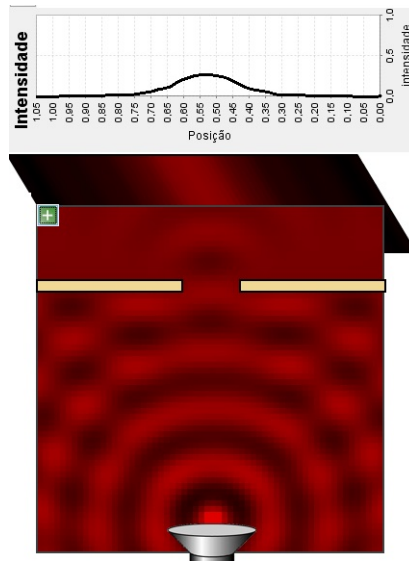


Figura 4.8: Experimento virtual Interferência de Ondas com uma fenda. Com nossas alterações.

2008).

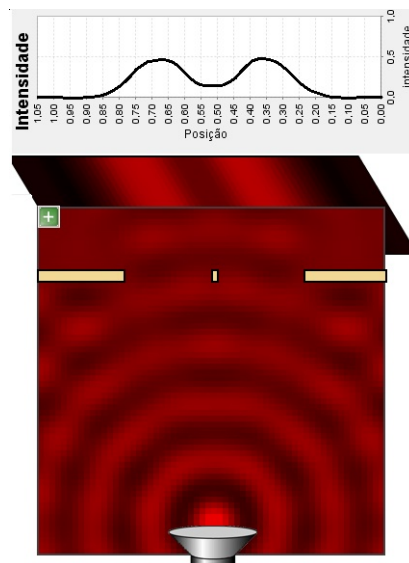


Figura 4.9: Experimento virtual Interferência de Ondas com duas fendas abertas. Com nossas alterações.

Na Figura 4.11a cobrimos a fenda da direita, os fótons apenas puderam passar pela fenda do lado esquerdo, conseqüentemente o gráfico de intensidade mostra o comportamento clássico. O mesmo vale para a Figura 4.11b. Resumindo, a Figura 4.11 mostra que quando uma das fendas é coberta o comportamento do fóton volta a ser clássico.

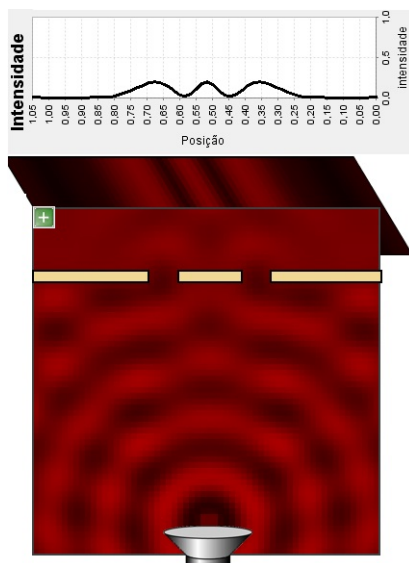


Figura 4.10: Experimento virtual Interferência de Ondas mostrando a interferência da luz de uma lâmpada que atravessa duas fendas.

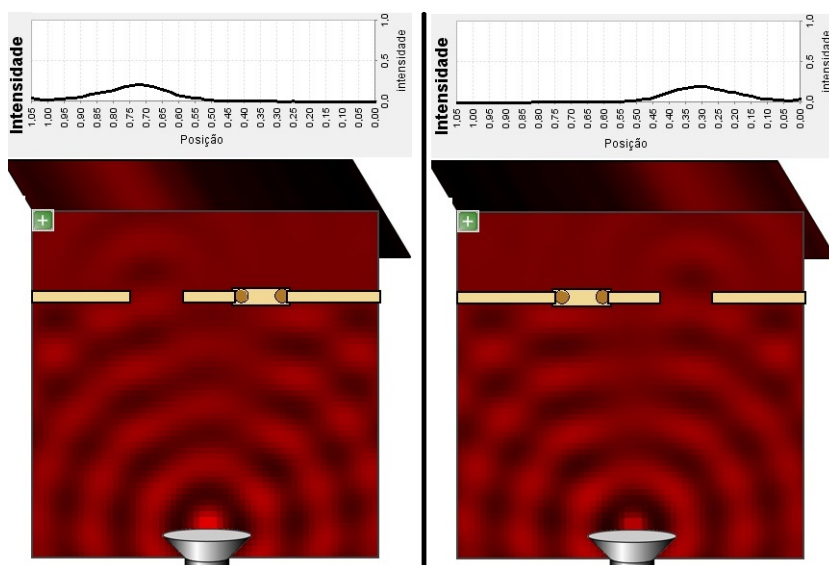


Figura 4.11: Experimento virtual Interferência de Ondas. *a)* a fenda da direita foi tampada. O comportamento do fóton volta a ser clássico. *b)* a fenda da esquerda foi tampada. O comportamento do fóton volta a ser clássico

4.3 Experimento Virtual da Dupla Fenda com Detectores

Entretanto o mais surpreendente neste fenômeno não é o comportamento quântico, mas sim o que acontece quando tentamos observar por qual fenda o fóton atravessa. Para mostramos o que acontece neste caso utilizaremos outro experimento virtual denominado

Interferência Quântica que é mostrado na Figura 4.12. Para construir o resultado apresentado na Figura 4.12 escolhemos trabalhar com a função “Partícula única”. Tal função mostra que os entes quânticos são partículas que chegam em unidades na tela. Optamos em duas fendas abertas e escolhemos a partícula elétron³.

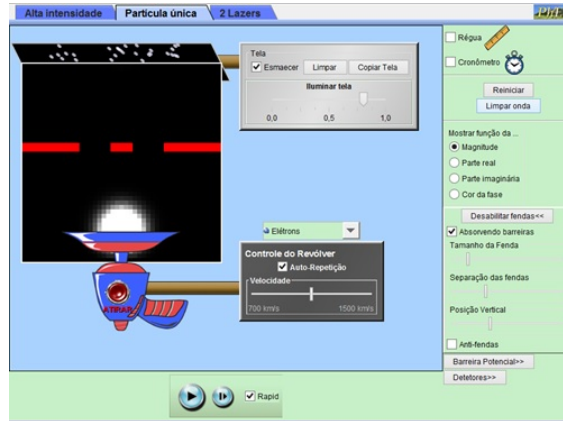


Figura 4.12: Experimento virtual Interferência Quântica. Podemos observar a interferência de elétrons com a formação das três colunas espaçadas por espaços vazios.

Este experimento virtual é completo no sentido de ferramentas para explicar o comportamento quântico de partículas subatômicas. Entretanto, o experimento virtual *Interferência de Ondas* da seção anterior possui a função que mostra o gráfico de intensidade. Didaticamente é mais simples entender o experimento da dupla fenda analisando as mudanças nos gráficos de interferência.

Podemos observar na Figura 4.12 a formação de três densidades granuladas de partículas, alternadas por espaços vazios, com maior intensidade de partículas.

A Figura 4.12⁴ revela o ponto mais misterioso da análise do experimento da dupla fenda com elétrons, fótons e outras partículas subatômicas. Quando tentamos observar o que acontece no experimento, isto é, quando colocamos detectores para analisar por qual fenda o fóton ou elétron passou, os comportamentos das partículas mudam. Não ocorre mais interferência. O fóton ou elétron se comporta como se fosse uma bala de metralhadora, ou seja, uma partícula clássica. Para tentar explicar o que é aceito sobre este misterioso fenômeno, nas duas próximas seções mostraremos como duas distintas escolas de pensamento interpretam este estranho fenômeno. Contudo, não há uma solução razoável para este enigma.

³Poderíamos escolher também: fótons, nêutrons ou átomos de hélio.

⁴Podemos colocar o detector na fenda do lado esquerdo e a concentração de partículas também mudará para o lado esquerdo.

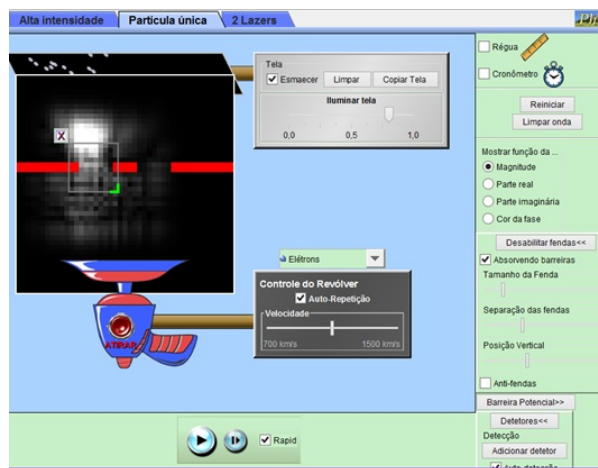


Figura 4.13: Experimento virtual Interferência Quântica. Podemos observar a destruição do padrão de interferência devido a maior concentração de partículas em um ponto específico da tela

4.4 Realismo Dualista Objetivo

Para mostrar esta escola de pensamento, devido a Einstein e de Broglie, utilizaremos como referencial o artigo de Bastos Filho e Siqueira (BASTOS FILHO, SIQUEIRA; 1993). Tal trabalho realiza uma análise através da lógica distributiva com o objetivo de mostrar que o experimento da dupla fenda não possui incognoscibilidade.

A bem do direito autoral, o desenvolvimento desta seção se deve aos autores supracitados. Indicamos fortemente a leitura deste trabalho para um aprofundamento maior do assunto desta seção. Mudanças relativas ao trabalho original (BASTOS FILHO, SIQUEIRA; 1993) se devem a necessidade de adequação a nossa pesquisa.

Inicialmente Bastos Filho e Siqueira (1993) sugere que objetos quânticos contém simultaneamente características corpusculares e ondulatórias, ou seja, a partícula fóton, por exemplo, possui uma onda associada. Para realizar o desenvolvimento através de lógica distributiva, os autores utilizam a seguinte notação:

$$\begin{aligned}
 A_1 &: \text{a partícula passa pela fenda A.} \\
 B_1 &: \text{a partícula passa pela fenda B.} \\
 A_2 &: \text{a onda passa pela fenda A.} \\
 B_2 &: \text{a onda passa pela fenda B.}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Podemos entender que os índices numéricos se referem a: (1) partícula e (2) onda. Lembrando que os conectivos lógicos são representados por \vee que se lê *ou* e \wedge que se lê *e*. Os autores prosseguem destacando que no contexto desta escola de pensamento temos eventos dos tipos:

Evento	Leitura	Possibilidade de Ocorrer
$A_e = A_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)$	Partícula passa pela fenda A e a onda associada passa pelas fendas A e B .	$A_e \vee B_e \longrightarrow$ (sim)
$B_e = B_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)$	Partícula passa pela fenda B e a onda associada passa pelas fendas A e B .	$A_e \wedge B_e \longrightarrow$ (Não)

Tabela 4.1: Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas

A coluna da direita significa que ou a partícula passa pela fenda A ou a partícula passa pela fenda B ($A_e \vee B_e$). Nunca a mesma partícula passa simultaneamente por ambas fendas ($A_e \wedge B_e$). A probabilidade de chegada de uma partícula em X_e é $P(X_e)$:

$$P(X_e) = P[X_e \wedge (A_e \vee B_e)] \quad (4.7)$$

que se lê o elétron chega em X_e ou por A_e ou por B_e . Utilizando a propriedade distributiva em 4.7, teremos

$$P(X_e) = P \left[\underbrace{\text{chega em } x \text{ por } A}_{(X_e \wedge A_e)} \vee \underbrace{\text{chega em } x \text{ por } B}_{(X_e \wedge B_e)} \right] \quad (4.8)$$

o conectivo \vee ou pode ser substituído por uma soma. Assim, teremos:

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A_e) + (X_e \wedge B_e)] \quad (4.9)$$

para entender a equação 4.9 devemos verificar que na tabela 1, quando temos fenômenos do tipo A_e ou B_e ($A_e \vee B_e$), significa que temos interações do tipo $(A_2 \wedge B_2)$, ou seja, onda passando pelas fendas A e B . Se uma onda passa por duas fendas, como no caso do experimento da fenda dupla, então ocorrerá interferência. Sendo assim, a equação 4.9 significa que a probabilidade do elétron chegar em X_e causa interferência na sua onda associada. Segundo o realista dualista objetivo, está é a causa de termos o resultado de interferência no experimento da dupla fenda. Podemos ainda reescrever a equação 4.9 para sintetizar o que acabamos de expor:

$$P(X_e) = P[\{X_e \wedge [A_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)]\} + \{X_e \wedge [B_1 \wedge (A_2 \wedge B_2)]\}] \quad (4.10)$$

o primeiro termo do lado direito significa que: *o objeto chega em x por A e onda por A e B* e o segundo termo do lado direito da equação 4.10 significa que: *o objeto chega em x por B e onda por A e B* . Os autores (BASTOS FILHO, SIQUEIRA; 1993) também utilizam as

regras de lógica distributiva para analisar o experimento da dupla fenda quando colocado instrumentos próximos as fendas para detectar por qual fenda o elétron passou. Para tanto, utilizam mais uma nomenclatura que aparece na tabela 4.2:

Evento	Leitura
$A'_e = A_1 \wedge (A_2 \wedge B'_2)$	A partícula passa pela fenda A e as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passa por B .
$B'_e = B_1 \wedge (A'_2 \wedge B_2)$	A partícula passa pela fenda B e as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passa por A .
$a'_e = A_1 \wedge (A'_2 \wedge B_2)$	A partícula passa pela fenda A e as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passa por A .
$b'_e = B_1 \wedge (A_2 \wedge B'_2)$	A partícula passa pela fenda B e as ondas passam pelas fendas A e B porém o instrumento absorve a onda que passa por B .

Tabela 4.2: Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas e o acréscimo de instrumentos nas regiões das fendas.

Na segunda linha da tabela 4.2 podemos concluir que devido ao fato da onda que deveria ter passado pela fenda B ter sido absorvida pelo instrumento de observação, o que de fato ocorreu foi uma partícula passar pela fenda A e uma onda também passar pela fenda A . Desta forma, podemos abreviar a notação como aparece na tabela 3:

Evento	Leitura	Nova notação
A'_e	Partícula passa pela fenda A e onda passa pela fenda A	$A''_e = A_1 \wedge A_2$
B'_e	Partícula passa pela fenda B e onda passa pela fenda B	$B''_e = B_1 \wedge B_2$
a'_e	Partícula passa pela fenda A e onda passa pela fenda B	$a''_e = A_1 \wedge B_2$
b'_e	Partícula passa pela fenda B e onda passa pela fenda A	$b''_e = B_1 \wedge A_2$

Tabela 4.3: Leitura das notações lógicas para o experimento da dupla fenda com partículas quânticas e o acréscimo de instrumentos nas regiões das fendas utilizando notação sintética.

desta forma o objeto chega em X_e **ou** com uma partícula passando por A e uma onda passando por A , **ou** com uma partícula passando por B e uma onda passando por B , **ou** com uma partícula passando por A e uma onda passando por B , **ou** com uma partícula passando por B e uma onda passando por A . Isto se resume na equação 4.11, em termos da tabela 4.2, podemos escrever:

$$P(X_e) = P[(X_e) \wedge (A'_e \vee B'_e \vee a'_e \vee b'_e)] \quad (4.11)$$

utilizando a propriedade distributiva, temos:

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A'_e) + (X_e \wedge B'_e) + (X_e \wedge a'_e) + (X_e \wedge b'_e)] \quad (4.12)$$

trocando os termos da equação pela tabela 4.3, teremos:

$$P(X_e) = P[(X_e \wedge A''_e) + (X_e \wedge B''_e) + (X_e \wedge a''_e) + (X_e \wedge b''_e)] \quad (4.13)$$

para que haja interferência devemos ter algum termo do tipo $(A_2 \wedge A_2)$ na equação 4.13. Olhando para a tabela 4.3 percebemos que não existe nenhum termo deste tipo. Desta forma o realista dualista objetivo explica com o padrão de interferência desaparece quando inserimos um detector no experimento da dupla fenda. Este fato também pode ser visualizado se inserirmos os termos da última coluna da tabela 3 na equação 4.13:

$$\begin{aligned} P(X_e) = & P\{[X_e \wedge (A_1 \wedge A_2)] + [X_e \wedge (B_1 \wedge B_2)] \\ & + [X_e \wedge (A_1 \wedge B_2)] + [X_e \wedge (B_1 \wedge A_2)]\} \end{aligned} \quad (4.14)$$

observando a equação 4.14 vemos que não existe nenhum termo cuja a combinação dos índices são (1) com (1), ou seja, a partícula passando pelas fendas A e B simultaneamente. Também não há nenhum termo cujos os índices são (2) com (2), isto é, a onda passando pelas fendas A e B ao mesmo tempo e gerando interferência.

4.5 Escola de Copenhagen

Os adeptos da escola de Copenhagen, devido a Niels Bohr (1885 – 1962) e Werner Heisenberg (1901 – 1976), são adeptos da exclusão mútua que aparece no princípio da complementariedade (PESSOA JR., 2003):

Um sistema quântico ou exibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo. Essas não são as palavras de Bohr, mas exprimem a sua noção de que onda e partícula são aspectos mutuamente excludentes, mas *complementares*, da natureza (PESSOA JR., 2003, p.18).

Sendo assim experimento da dupla fenda é explicado observando o arranjo experimental. Caso o arranjo seja apenas a dupla fenda, este arranjo é do tipo que exibe propriedades ondulatórias dos objetos quânticos. Um arranjo experimental é classificado como do tipo a exibir o caráter ondulatório, se neste aparato não tiver nenhum dispositivo que permita verificar a trajetória da partícula.

No caso em que são colocados detectores próximos aos orifícios no aparato experimental

da dupla, estes detectores poderão mostrar por qual fenda o objeto quântico atravessou. Consequentemente, este aparato experimental é do tipo que exhibe as propriedades de partícula do objeto quântico. Um arranjo experimental é classificado com do tipo a exibir o caráter de partícula, se neste aparato tiver algum dispositivo que permita verificar a trajetória da partícula.

O formalismo matemático utilizado para representar o pensamento da Escola de Copenhague não são necessariamente o princípio da incerteza. No próximo capítulo, partiremos do pensamento segundo a Escola de Copenhague para desenvolver o formalismo matemático da mecânica quântica.

Capítulo 5

O Formalismo Matemático da Mecânica Quântica

Para iniciarmos este capítulo, sobre o formalismo matemático da mecânica quântica, coletamos algumas falas de Feynman e colaboradores (FEYNMAN *et. al.*, 2008) destacando a facilidade do uso deste ferramental matemático:

Chegamos à conclusão de que as chamadas “partes avançadas” da mecânica quântica são de fato muito simples. A matemática necessária é particularmente simples, envolvendo operações algébricas simples, sem equações diferenciais ou no máximo as mais simples delas. O único problema é que temos que pular a lacuna de não sermos mais capazes de descrever o comportamento *em detalhe* das partículas no espaço. (FEYNMAN *et al.*, 2008, p.3-1).

O assunto avançado ao qual Feynman se refere é o spin do elétron que é tratado nos capítulos seguintes de seu livro de Lições de Física (FEYNMAN *et. al.*, 2008). O autor ainda relata que “*Na verdade, uma das razões de tentarmos ser cuidadosamente precisos nos capítulos seguintes é que podemos mostrar uma das coisas mais bonitas da mecânica quântica – o tanto que se pode deduzir de tão pouco*”.

Devemos observar que no ensino de física moderna no ensino médio pouco é feito sobre o desenvolvimento matemático. No decorrer deste capítulo mostraremos como a notação de Dirac pode ser utilizada no contexto do ensino de física no ensino médio. Para tanto, desenvolvemos a seguir uma revisão literária do livro de Lições de Física¹ de Feynman e colaboradores (FEYNMAN *et. al.*, 2008) com algumas alterações para adaptar a noção de vetores de estado no ensino médio.

Antes de iniciarmos esta abordagem façamos duas considerações. Na seção 4.2 foi possível mostrar que objetos quânticos sofrem interferência no experimento da dupla fenda, quando não há nenhum detector próximo as fendas. Devido a este fato, e as ondas também

¹Especificamente realizamos uma revisão dos capítulos de 3 a 5 do volume 3 de mecânica quântica.

sofrerem interferência, podemos realizar comparações entre objetos quânticos e ondas.

Primeiro, a equação para interferência de ondas (equações 3.19) foi analisada em aspectos de suas intensidades. A intensidade é proporcional a amplitude (altura) ao quadrado (equação 3.18) da onda que chega em x . Da mesma forma fazemos para elétrons trocando intensidade por probabilidade. Deste fato surge a nomenclatura amplitude de probabilidade para objetos quânticos, pois assim como as ondas são analisadas em termos do quadrado da amplitude da onda, os objetos quânticos são analisados em termos do quadrado da amplitude de probabilidade². O segundo ponto a destacar é o fato da necessidade da amplitude de probabilidade de ser um número complexo. Isto se deve a representação realizada na equação (3.9) para a equação de onda. Sendo assim, esta característica das amplitudes de probabilidade é evidenciada com a comparação com as ondas. Entretanto deve-se destacar que o fato da amplitude de onda ser complexa não interfere no resultado da medida de probabilidade, que sempre corresponde com resultados expresso por números reais³.

5.1 Vetores de Estado

Inicialmente mostramos os princípios gerais⁴ (ou regras gerais) para utilizar a notação específica da mecânica quântica. Não discutiremos neste momento, mas esta introdução é um método criado por Feynman e colaboradores com a finalidade de destacar a facilidade do uso de vetores de estado.

Nosso *primeiro princípio geral* da mecânica quântica é que a probabilidade de que uma partícula chegará em x , quando sai da fonte s , pode ser representada quantitativamente pelo quadrado de um número complexo chamado de *amplitude de probabilidade* – nesse caso, a “amplitude que uma partícula saindo de s chega em x ”(FEYNMAN *et al.*, 2008, p.3-2).

²Este fato é expresso no primeiro princípio geral e representado na equação 5.3. Ver slide 1 do produto final.

³Seja um número complexo z representado por:

$$z = a + i \cdot b$$

onde a é a parte real e $i \cdot b$ é a parte imaginária e i é a unidade imaginária ($i^2 = -1$). O complexo conjugado de z é o z^*

$$z^* = a - i \cdot b$$

O produto de dois números complexos é:

$$z^* z = (a + i \cdot b)(a - i \cdot b) = a^2 + i \cdot ab - i \cdot ab + b^2 = a^2 + b^2$$

Este resultado é um número real. Sendo assim, o quadrado de números complexos corresponde a um resultado real. Mesmo assim, não deve-se atribuir nenhuma realidade a onda da amplitude de probabilidade da equação de Schrödinger (que não será discutida neste trabalho).

⁴Consultar o slide 1 do produto final.

A representação da amplitude de probabilidade é:

$$\langle \text{partícula chega em } x | \text{partícula deixa } s \rangle \quad (5.1)$$

$\langle \dots \rangle$ é um sinal equivalente a amplitude de que

$$\begin{aligned} &| \dots \rangle \text{ condição } \textit{inicial} \\ &\langle \dots | \text{ condição } \textit{final} \end{aligned} \quad (5.2)$$

uma forma de resumir mais a notação $\langle x | s \rangle$ e enfim escrever a probabilidade do primeiro princípio geral:

$$P = |\langle x | s \rangle|^2 \quad (5.3)$$

Tal amplitude é apenas um número, um número complexo. O segundo princípio⁵ é:

[...] *segundo princípio geral* da mecânica quântica, quando uma partícula pode alcançar um certo estado por duas rotas possíveis, a amplitude total para o processo é a *soma das amplitudes* para cada rota separadamente (FEYNMAN *et al.*, 2008, p.3-2, 3-3).

Com a nova notação temos:

$$\langle x | s \rangle_{\text{ambos orifícios abertos}} = \langle x | s \rangle_{\text{através de 1}} + \langle x | s \rangle_{\text{através de 2}} \quad (5.4)$$

Supõem-se que os orifícios sejam suficientemente pequenos de tal forma que quando dissermos que o elétron passou através do orifício, não precisamos discutir em qual parte do orifício o elétron passou. O terceiro princípio⁶ é destacado como:

Agora podemos escrever com mais detalhes o que podemos dizer sobre a amplitude para o processo no qual o elétron chega em x pelo orifício 1. Podemos fazer isto usando o nosso *terceiro princípio geral*: quando uma partícula vai por alguma rota particular a amplitude para aquela rota pode ser escrita como o *produto da amplitude* para ir parte do caminho com a *amplitude* de ir o restante (FEYNMAN *et al.*, 2008, p.3-3).

assim a amplitude para ir de s a x pelo orifício 1 é igual a amplitude de ir se s até 1, multiplicado pela amplitude de ir de 1 a x . O mesmo vale para a ir pelo orifício 2.

$$\begin{cases} \langle x | s \rangle_{\text{via 1}} = \langle x | F_1 \rangle \langle F_1 | s \rangle \\ \langle x | s \rangle_{\text{via 2}} = \langle x | F_2 \rangle \langle F_2 | s \rangle \end{cases} \quad (5.5)$$

⁵Consultar o slide 2 do produto final.

⁶Consultar o slide 3 do produto final.

a equação deve ser lida da direita para a esquerda: o elétron vai de s a x , e então, de 1 a x . Portanto, podemos escrever que:

$$\langle x|s\rangle_{ambos} = \langle x|F_1\rangle \langle F_1|s\rangle + \langle x|F_2\rangle \langle F_2|s\rangle \quad (5.6)$$

Feynman *et. al.* (2008) ainda destaca que “*Entretanto deve ser enfatizado que a função de onda que satisfaz a equação não é uma onda real no espaço; não podemos atribuir nenhuma realidade a essa onda como fazemos com a onda sonora*”.

Não é uma boa ideia pensar em termos de ondas de partícula. Quando trabalhamos com duas (ou mais) partículas precisamos do seguinte princípio adicional: [...] desde que duas partículas não interajam, a amplitude que uma partícula faça uma coisa e a outra partícula faça outra é o produto das duas amplitudes que as duas partículas fariam as duas coisas, separadamente. (FEYNMAN *et al.*, 2008, p.3-4).

É possível fazer previsões do que ocorre pós a fenda se for dado as amplitudes de ter chegado nos orifícios (Feynman *et. al.*, 2008, p.3-5).

5.2 O Padrão de Interferência de Duas Fendas

A situação analisada nesta seção é de profunda importância. Feynman explica, através de vetores de estado a estranheza no experimento da dupla fenda, quando se coloca um detector e uma fonte de luz em busca de descobrir por qual caminho o elétron rumou para chegar no anteparo final. Para sintetizar a notação definimos ϕ_1 como a amplitude para o elétron chegar em x pelo orifício 1, ou seja:

$$\phi_1 = \langle x|F_1\rangle \langle F_1|s\rangle \quad (5.7)$$

e ϕ_2 a amplitude para o elétron chegar no detector através do orifício 2, isto é:

$$\phi_2 = \langle x|F_2\rangle \langle F_2|s\rangle \quad (5.8)$$

estas são as amplitudes para ir pelos dois orifícios e chegar em x , se não houver fótons interagindo que o elétron.

A amplitude para o processo no qual o elétron começa em s e um fóton é liberado pela fonte de luz L , finalizando com o elétron em x e um fóton visto atrás da fenda, supondo que observamos o fóton atrás da fenda 1 por meio de um detector D1, requer que adotemos uma amplitude para um fóton chegar em D_1 e um elétron chegar em x^7 , e também uma amplitude para um fóton chegar em D_2 e um elétron chegar em x^8 .

⁷Esta amplitude será simbolizada por “ a ”.

⁸Esta amplitude será simbolizada por “ b ”.

Para tanto, adotamos a seguinte nomenclatura que aparece nas tabelas 5.1 e 5.2.

Amplitude de Probabilidade	Descrição da Amplitude
$\langle F_1 s \rangle$	elétron vai da fonte s para o orifício 1
a	elétron no orifício 1 espalha um fóton no detector D_1
$\langle x F_1 \rangle$	elétron vai da fenda 1 para o detector de elétron em x

Tabela 5.1: Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pela fenda F_1 e espalha um fóton no detector D_1 .

Amplitude de Probabilidade	Descrição da Amplitude
$\langle F_2 s \rangle$	elétron vai da fonte s para o orifício 2
a	elétron no orifício 2 espalha um fóton no detector D_1
$\langle x F_2 \rangle$	elétron vai da fenda 2 para o detector de elétron em x

Tabela 5.2: Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pela fenda F_2 e espalha um fóton no detector D_1 .

Podemos escrever desta forma as amplitudes para o elétron passar por uma dada fenda e espalhar um fóton da lâmpada no detector. Para, tanto

Amplitude de Probabilidade	Descrição da Amplitude
$\langle x F_1 \rangle a \langle F_1 s \rangle = a\phi_1$	amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 1 e espalha um fóton em D_1
$\langle x F_2 \rangle b \langle F_2 s \rangle = b\phi_2$	amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 2 e espalha um fóton em D_1

Tabela 5.3: Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pelas fendas F_1 e F_2 e espalham fótons no detector D_1 .

Neste momento sugerimos que o leitor use o produto final. Praticamente todo o capítulo 5 está em slides com animações. Usando o produto final é possível ver como se forma as amplitudes de probabilidade dinamicamente através de animações.

Usando o segundo princípio geral: “quando uma partícula pode alcançar um certo estado por duas rotas possíveis, a amplitude total para o processo é a soma das amplitudes para cada rota separadamente”. Podemos escrever que a amplitude de probabilidade para um elétron que sai de s e chega em x , por alguma das fendas e, espalha fótons no detector D_1 , é a soma dos dois termos (tabela 5.3), que representa cada possível trajetória do elétron:

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_1 \end{array} \middle| \begin{array}{l} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{array} \right\rangle = a\phi_1 + b\phi_2$$

nas figuras 5.1 e 5.2 mostramos as amplitudes de probabilidade da tabela 5.3. Mostramos estas figuras para, pôr simetria, escrever a amplitude de probabilidade para um elétron que sai de s e chega em x , por alguma das fendas e, espalha fótons no detector D_2 . Podemos

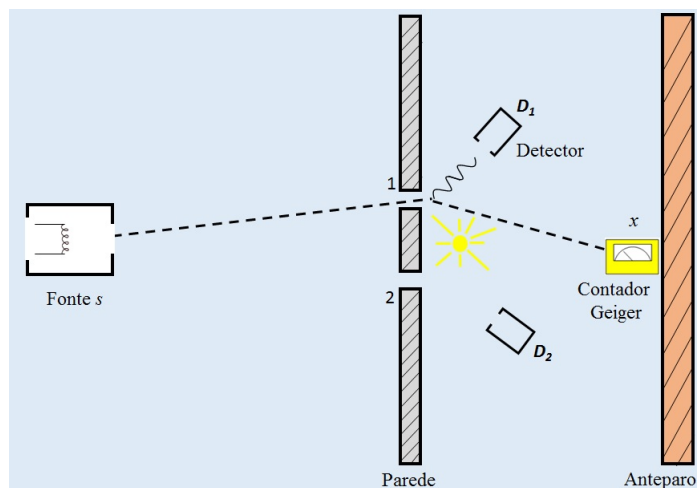


Figura 5.1: Elétron sai de s passa pela fenda 1 espalha um fóton no detector D_1 .

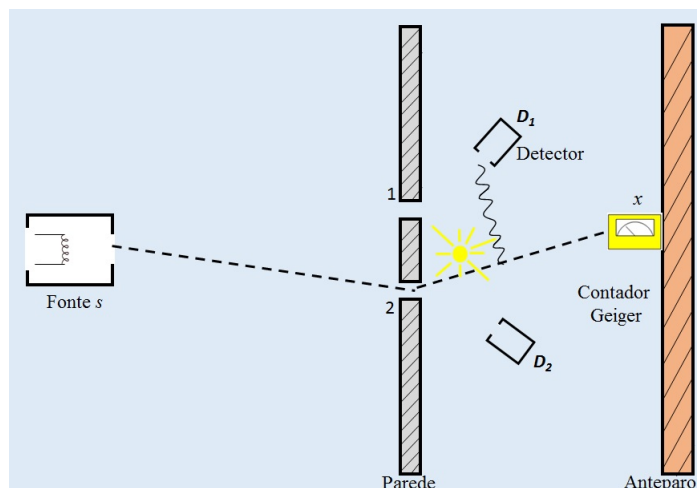


Figura 5.2: Elétron sai de s passa pela fenda 2 espalha um fóton no detector D_1 .

observar na Figura 5.1 o elétron no orifício 1 espalha um fóton no detector D_1 e amplitude de probabilidade para este fenômeno é: a (tabela 5.1). Da mesma forma, na Figura 5.2 o elétron no orifício 2 espalha um fóton no detector D_1 e amplitude de probabilidade para este fenômeno é: b (tabela 5.2). Observando as figuras 5.3 e 5.4: Na Figura 5.1 o elétron espalha um fóton similarmente ao espalhamento mostrado na Figura 5.3. Determinamos no fenômeno mostrado na Figura 5.1 que a amplitude de probabilidade fosse igual a “ a ”. Por simetria podemos determinar que o espalhamento mostrado na Figura 5.3 também é igual a “ a ”. Da mesma forma, na Figura 5.2 o elétron espalha um fóton similarmente ao espalhamento mostrado na Figura 5.4. Determinamos no fenômeno mostrado na Figura 5.2 que a amplitude de probabilidade fosse igual a “ b ”. Por simetria podemos determinar que o espalhamento mostrado na Figura 5.4 também é igual a “ b ”. Resumindo:

Podemos escrever que a amplitude de probabilidade para um elétron que sai de s e

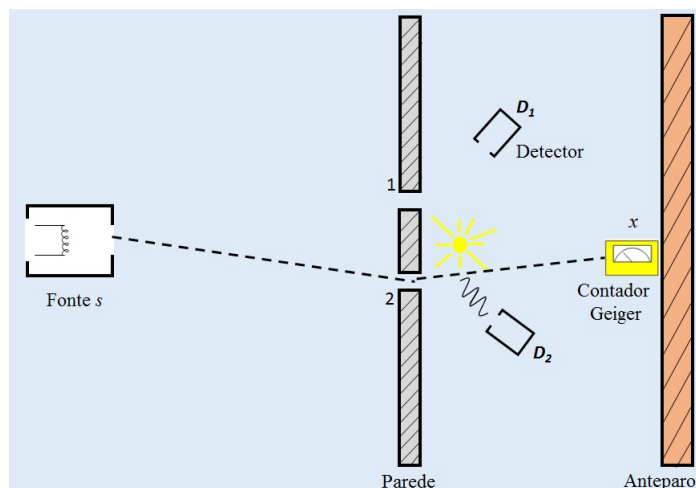


Figura 5.3: Elétron sai de s passa pela fenda 2 espalha um fóton no detector D_2 .

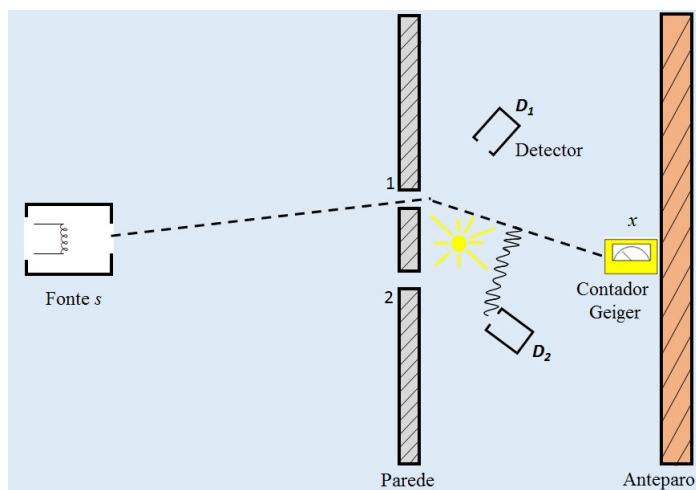


Figura 5.4: Elétron sai de s passa pela fenda 1 espalha um fóton no detector D_2 .

Amplitude de Probabilidade	Descrição da Amplitude
$\langle x F_2 \rangle a \langle F_2 s \rangle = a\phi_2$	amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 1 e espalha um fóton em D_2
$\langle x F_1 \rangle b \langle F_1 s \rangle = b\phi_1$	amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 2 e espalha um fóton em D_2

Tabela 5.4: Vetores de estado das amplitudes de probabilidade dos elétrons que passam pelas fendas F_1 e F_2 e espalham fótons no detector D_2 .

chega em x , por alguma das fendas e, espalha fótons no detector D_1 , é a soma dos dois termos (tabela 5.3), que representa cada possível trajetória do elétron:

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_2 \end{array} \middle| \begin{array}{l} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{array} \right\rangle = a\phi_1 + b\phi_2$$

Com estes resultados podemos determinar, por exemplo, a probabilidade de obter contagem em D_1 e um elétron em x . Usando o primeiro princípio geral no qual devemos tomar o quadrado da amplitude de probabilidade estabelecida na equação anterior:

$$P(D_1, x; s) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2 \quad (5.9)$$

Analisando a equação (5.9) não é possível inferir por qual fenda o objeto quântico atravessou para chegar em x . Quando não conseguimos dizer qual a trajetória do objeto quântico, observaremos interferência. Entretanto se tamparmos a fenda 2 consequentemente o objeto quântico apenas poderá chegar em x através do orifício 1. Desta forma podemos conhecer a trajetória do objeto quântico. Tampar a fenda 2 significa fazer na equação (5.9) ϕ_2 , isto é:

$$P(D_1, x; s) = |a\phi_1 + b \cdot 0|^2 = |a\phi_1|^2 = |a|^2 |\phi_1|^2 \quad (5.10)$$

O gráfico da equação (5.10) é uma curva parabólica, isto é, o objeto quântico se comporta como partícula quando se cobre uma das fendas. No produto final mostramos alguns exemplos da aplicação da análise feita por vetores de estado.

Para determinar qual a probabilidade de encontramos um elétron em x e um fóton em D_1 ou D_2 é necessário observar que: (i) nunca se deve somar amplitudes de estados finais diferentes e distintos e; (ii) apenas se soma amplitudes para diferentes alternativas indistinguíveis dentro do experimento, antes que termine o processo, (Feynman *et. al.*, 2008) assim:

$$P(D_2, D_1, x; s) = \left| \left\langle \begin{array}{l} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_1 \end{array} \middle| \begin{array}{l} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{array} \right\rangle \right|^2 + \left| \left\langle \begin{array}{l} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_2 \end{array} \middle| \begin{array}{l} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{array} \right\rangle \right|^2$$

$$= |a\phi_1 + b\phi_2|^2 + |a\phi_2 + b\phi_1|^2$$

Capítulo 6

Metodologia

A pesquisa no âmbito científico pode variar entre as abordagens quantitativa e qualitativa (BAPTISTA, 1999) que se diferem na investigação científica, isto é, nas questões ontológicas, epistemológicas e metodológicas (MARIO, 2000). Entretanto, por mais que os termos denotem expressões opostas, ambos podem coexistir através de técnicas e instrumentos, tanto qualitativos quanto quantitativos, numa mesma pesquisa. Este último é exatamente o que acontece nesta pesquisa. A abordagem qualitativa faz parte de um método científico (PADUA, 1997) que se baseia na concepção objetivista, isto é, a realidade existe independentemente do sujeito e do significado relacionada a ela, o que de fato acontece com a física na descrição de fenômenos através de leis e teoremas. Segundo (BOGDAN, BIKLEN; 1994), a pesquisa qualitativa apresenta cinco características centrais: *i*) O envolvimento do(a) pesquisador(a) na coleta de dados; *ii*) A descrição dos fenômenos; *iii*) A ênfase ao processo; *iv*) A análise indutiva; e *v*) A preocupação com o significado”.

As três principais técnicas e instrumentos para desenvolver pesquisa qualitativa são: observação, entrevista e análise documental (LÜDKE *et. al.* 2011; CROTTY, 1998). Sinteticamente, a observação é a descrição de comportamentos, de ações, de atitudes e de valores próprios do sujeito e do contexto ao qual pertence, a entrevista tem como finalidade obter informações, dados e respostas do grupo pesquisado para realizar a análise da pesquisa e a documentação, conhecer de forma aprofundada o contexto estudado. Já a entrevista é do tipo estruturada, pois possui um roteiro fechado, parecido com a aplicação de um questionário (LIMA *et. al.*, 2011; GABASSA, 2009) para o desenvolvimento do perfil epistemológico do grupo de alunos de ensino médio e/ou graduação. A documentação envolve pesquisas em fontes primárias e secundárias sobre as principais contribuições do tema da pesquisa em artigos científicos e publicações em revistas conceituadas para o desenvolvimento do perfil epistemológico com base na história da ciência. Enfim, a metodologia utilizada nesta pesquisa é uma abordagem qualitativa/quantitativa, o pesquisador em contato direto com a pesquisa, entrevista estruturada e documentação em referências primárias e secundárias.

6.1 Processo de Escolha do Experimento Virtual

Inicialmente dialogamos sobre os termos utilizados neste texto sobre o recurso experimental virtual, a literatura nos traz diferentes nomenclaturas como: laboratório virtual, experimento virtual, atividade experimental simulada. Não parece haver um consenso sobre qual a forma correta deve ser utilizada ao se referir a este tipo de recurso. Neste trabalho, trataremos todos estes termos como sendo equivalentes.

Entendemos que objetivo de atividade simulada é realizar um experimento sem necessidade de recursos laboratoriais, de forma objetiva e com profunda oportunidade de exploração. A bem da justificativa, não defendemos que o laboratório virtual supera ou substitui o experimento realizada na bancada. Os objetivos são diferentes entre a prática experimental na bancada e o experimento virtual. Cada qual possui distintas formas de investigação experimental para conquistar o resultado final. Podemos utilizar dois recursos: experimentos mentais ou experimentos virtuais, este último corresponde a nossa escolha.

Alguns pontos iniciais importantes, isto é, situações que nos chamaram a atenção antes do uso de aplicativos, a se destacar na escolha deste experimento virtual:

- i)* O idioma utilizado para manipular o aplicativo;
- ii)* Possibilidade de ser realizado download do experimento virtual;
- iii)* Gratuidade do aplicativo;
- iv)* Sítio eletrônico confiável;
- v)* Formato do arquivo; Destacamos estes cinco pontos em decorrência de dificuldades e frustrações que por ventura podem acontecer com aqueles que buscam utilizar o recurso

de atividades experimentais virtuais.

No primeiro item destacamos o idioma pois muitos aplicativos se encontram, principalmente, em inglês. Este fato causa frustração tanto no aluno que se sente limitado para utilizar o laboratório virtual diante da língua estrangeira, que não é de domínio de todos, quanto do professor que perde tempo precioso traduzindo os termos que aparecem no experimento. Existe ainda um contra-argumento a este item. Muitos experimentos virtuais possuem poucas ferramentas acompanhadas de palavras que são essenciais para o seu pleno funcionamento, ou seja, mesmo estando em outro idioma pode ser utilizado sem grandes problemas.

Já o segundo tópico ostenta relevante importância. O PHET permite que seja realizado o download de qualquer experimento virtual sem impor grandes dificuldades, por exemplo: não é necessário realizar nenhum cadastro ou, realizar o download de algum outro programa para o funcionamento adequado do laboratório virtual. Entretanto, deste tópico, o mais importante a ser destacado é a possibilidade de poder utilizar o laboratório virtual off-line, isto é, sem nenhuma conexão com a internet. Poderia ser questionado este tópico no sentido de que existem facilidades para o uso da internet. Sendo assim,

a possibilidade de ser realizado um único download do laboratório virtual, sem grandes dificuldades instalar o aplicativo em quantas máquinas forem necessárias, não necessitar do uso da internet, ou seja, limitarmos a perda de atenção, todos estes argumentos fomentam a assertiva sobre o download não ser custoso desfrutar de destaque neste trabalho. Temos considerada quantidade de sítios eletrônicos que possibilitam a oportunidade de utilizar laboratórios virtuais, entretanto, reduzido é a quantidade daqueles que possui a qualidade exaltada neste parágrafo.

O terceiro tópico é relevante em dois sentidos. Primeiro, a gratuidade do experimento virtual não segrega públicos, ou seja, o portador desta ferramenta independe de seu estado financeiro, mas sim, da procura (direcionamento por parte dos professores) de ferramentas que facilitem a aprendizagem. Num segundo sentido, não necessitar dispendir algum valor monetário para aquisição deste recurso amplia as possibilidades de aplicação de atividades experimentais simuladas por mais profissionais da área da educação em diferentes públicos.

Não menos importante, o quarto tópico denota uma situação frequente com aqueles que utilizam a internet como forma de ensino e aprendizagem. Existe uma grande variedade de sítios eletrônicos que possibilitam pesquisa sobre assuntos científicos. Mas a confiabilidade no que é informado não contempla todas estas fontes de pesquisa.

Por último, pode parecer irrelevante, ou exagero, destacar o formato do programa do laboratório virtual. Contudo, o público escolar é heterogêneo, alguns possuem exímias habilidades com aparelhos como computadores, outros, utilizam a ferramenta para acessar redes sociais. O mínimo de dificuldade acarreta frustração e desmotivação em realizar a atividade, mesmo que diferenciada. O formato java é gratuito e de fácil instalação em máquinas que não o possui. Portanto, fez-se necessário este item.

6.2 Justificativas do uso de Experimentos Virtuais no Ensino de Física

Discutiremos nesta seção as características que denotam a importância e a eficiência para o uso de atividades experimentais no ensino de física. Entretanto, inicialmente dialogaremos sobre a frente que não é a favor do uso de atividades experimentais simuladas. Para tanto, destacamos o trecho de Medeiros (2002):

É verdade que uma boa simulação pode comunicar melhor do que imagens estáticas, ou mesmo do que uma sequência delas, ideias sobre movimentos e processos em geral. Nisso se fundamenta, basicamente, a decantada superioridade das representações computacionais aquelas contidas nos livros didáticos. Inferir-se da, entretanto, que as simulações seriam ao menos equiparáveis aos experimentos reais, constitui-se em um enorme equívoco. (MEDEIROS, 2002, p.181).

O uso de experimentos virtuais no ensino de física ainda sofre críticas como a de Medeiros (2002) que atribui a falibilidade do experimento virtual devido a inabilidade do operante. Não deve-se esperar que simuladores substituam o experimento sobre a bancada. Entretanto, é uma desonestidade intelectual não tratar o experimento virtual com o mesmo rigor metodológico com que se trata o experimento sobre bancada. Especificamente, estamos destacando que o uso deste OED (Objeto Educacional Digital) pressupõe que o docente elabore um roteiro com objetivos específicos, isto é, seja demonstrar uma lei científica, encontrar uma equação através de medidas ou mostrar fenômeno.

Entretanto, qual o real sentido de realizar uma dada atividade experimental? Ampliando as fronteiras da questão proposta: qual o sentido do experimento para o cientista? Chalmers (1993) responde:

Observações e experimentos são realizados no sentido de testar ou lançar luz sobre alguma teoria, e apenas aquelas observações consideradas relevantes devem ser registradas. Entretanto, uma vez que as teorias que constituem nosso conhecimento científico são falíveis e incompletas, a orientação que elas oferecem, como por exemplo, as observações relevantes para algum fenômeno sob investigação, podem ser enganosas e podem resultar no descuido com alguns importantes fatores. (CHALMERS, 1993, p. 58)

Notável característica do infinito universo de possibilidades investigativas reside no experimento sobre a bancada. Porventura não seria este o ponto a se repensar antes deste tipo de atividade? Pode parecer contraditório, mas pensado no ensino básico de física, onde normalmente o professor possui duas aulas de 50 minutos semanais, o tempo necessário para se investigar resultados aproximados, erros experimentais, resultados absurdos, inviabilidade de se realizar o experimento (por exemplo fatores meteorológicos), não é muito esforço para pouco.

Não podemos justificar a necessidade de realização de um experimento em sala de aula quando pouco é alcançado, tanto cognitivamente quanto didaticamente. A bem de eliminar qualquer obscuridade da nossa proposta, a nossa crítica não repousa sobre a refutação da aplicação de práticas experimentais sobre a bancada. Pelo contrário, entendemos que está é necessária. Mas não pode nem ser constante a ponto de ser o único recurso para discutir o caráter experimental da física nem abandonada diante das dificuldades impostas pela sua realização.

Normalmente, a literatura destaca as desvantagens do experimento virtual como sendo: *i*) diferenças significativas entre o real e o simulado; *ii*) aparências ilusórias que confundem o virtual com o real; *iii*) imprecisão e incertezas; *iv*) simulação não é prova concreta, experimento real sim; *v*) apresentam pobre interação social; *vi*) necessidade de formação inicial e contínua de professores; *vii*) escassez de tempo.

Inicialmente, o experimento sobre a bancada é erroneamente denominado como expe-

rimento real. Afim de explicar está assertiva, não conduzimos o dialogo no sentido em que o experimento sobre a bancada não é real. Evidenciamos o erro na sentença mutuamente excludente, que impõem sobre todos as outras atividades experimentais um sentido de falso, ou irreal.

Deve-se destacar em *i)* que o experimento virtual é uma simulação, ou seja, uma imitação do real para facilitar a estrutura visual. Mas o caráter de concreto não está no que é manipulado e sim na ação de realizar a atividade experimental. Apenas esta mudança de abordagem analítica quando realizado atividades práticas, conduz ao aumento da objetividade.

Já em *ii)* o docente pode esclarecer quais as diferenças significativas entre o real e o simulado. Entretanto, já destacamos, apoiados em Chalmers (1993), que o aumento da periferia de resultados pode conduzir o olhar do aluno para pontos desnecessários e frustrantes. Em *iii)* é justamente as inúmeras incertezas e imprecisões que prejudicam a aplicação do experimento real em aula.

No *iv)* destacamos que o experimento virtual é construído sobre um algoritmo que possui variantes que corroboram para o experimento possuir um resultado correto, mas existe inúmeros experimentos virtuais que possui erros experimentais. Tais erros incomparáveis ao cansaço consequente do experimento sobre a bancada.

A interação social de *v)* depende de como o experimento é aplicado. Normalmente pela baixa quantidade de microcomputador na escola é necessário que os trabalhos sejam feitos em grupo, onde cada integrante possui um papel específico. Em nossas atividades com experimentos virtuais, orientamos os alunos a dividirem-se em diferentes funções: relator, investigador e experimentador. O relator anota os dados coletados na experiência. O investigador busca em matérias didáticos referências que o auxilie no entendimento do fenômeno. O experimentador, é aquele que manipula o experimento. Como em nossos roteiros, os alunos possuem vários objetivos a serem alcançados, pedimos que eles revezem suas funções.

A formação inicial do professor *vi)* tanto necessita acontecer para o uso de experimentos sobre a bancada quanto para o uso de experimentos simulados. Este trabalho tenta auxiliar neste sentido. A escassez de tempo *vii)* é um problema constante independente da atividade que será realizada. Experimentos ditos “reais” com maior grau de dificuldade de montagem e que podem possuir grandes obstáculos para que se atinja o objetivo, deveriam ser realizados através de experimentos virtuais. Mas se a montagem do experimento sobre a bancada é demasiadamente simples, deve-se optar pelo experimento “real”, ou seja, ambos tipos distintos de experimentos são mutuamente excludentes, isto é, quando se opta por um tipo de experimento, real ou virtual, automaticamente não se realiza o outro.

6.3 Quanto a Cognição com Experimentos Virtuais

Podemos nos perguntar o que cognitivamente é alcançado quando se trabalha com experimentos virtuais. Antes de responder esta questão é importante que fique claro que não desenvolveremos um aprofundamento sobre as metodologias cognitivas.

Pensando em cognição como o processo pelo qual se adquire conhecimento, realizamos a defesa do uso de atividades experimentais simuladas contrastando o experimento virtual com a atividade experimental realizada sobre a bancada. Sendo assim, primeiro destacamos porque a atividade experimental possui profunda importância para a classe de cientistas indutivistas (CHALMERS, 1993):

De acordo com o indutivista ingênuo, a ciência começa com a observação, a observação fornece uma base segura sobre a qual o conhecimento científico pode ser construído, e o conhecimento científico é obtido a partir de proposições de observação por indução (CHALMERS, 1993, p. 55).

Desta forma os adeptos do experimento sobre a bancada se defendem frases como: “*A física é uma ciência experimental*” ou, “*Só é possível aceitar uma lei se a mesma for verificada experimentalmente*” ou ainda, “*O ensino de física sem práticas experimentais não faz sentido e é descontextualizado*”. Nenhuma destas asserções são falsas. Portanto, conclui-se grossamente: “*Devemos realizar experimentos “reais”, pois assim mostraremos a verdade, na maior quantidade possível em sala de aula para prevalecer o caráter experimental da física*”. Esta afirmação possui problemas.

Antes de mais nada, devemos pensar no contexto do ensino de física para realizar tal afirmação. A maior parte das escolas não dispõem de laboratórios. Sendo assim, as atividades normalmente são realizadas na sala de aula ou em qualquer outro ambiente¹ que não seja um laboratório. O mesmo é válido para materiais para realizar a prática experimental. A defesa dos adeptos a experimentos sobre a bancada, neste sentido, é realizar atividades com materiais de baixo custo. Concordamos. Entretanto, deve-se perceber que a atividade experimental fica sem contexto. A geração de alunos do ensino médio que lecionamos nasceu imerso na tecnologia. Não faz sentido mostrar o funcionamento de um aparelho televisor² de tubo sendo que estes aparelhos praticamente estão extintos. Explicar, por exemplo, o funcionamento de uma tela LED requer física quântica. Atividades experimentais de física quântica, quase na sua totalidade³, requer laboratórios estruturados.

Desta forma propomos o recuo para o experimento virtual. É possível reproduzir qual-

¹Por exemplo: pátio, quadra ou ambientes externos.

²Esta afirmação é uma constatação. Um aparelho televisor de tubo possui um tubo de raios catódicos o qual possui interesse sim no ensino de física. Mas infelizmente, é descontextualizado levando em conta que atualmente temos televisores com telas LED, Full HD, 4k e etc.

³Existe atividades experimentais com materiais de baixo custo como por exemplo o espectroscópio. Mas são poucos fenômenos que conseguimos explicar com estas atividades.

quer atividade experimental independentemente do assunto. Por exemplo, neste trabalho poderíamos mostrar a interferência entre fótons em aparato experimental denominado experimento de Michelson-Morley (PESSOA Jr., 2003). Para tanto precisaríamos de laser, polaroides, fixadores, espelhos refletores dentre outros. Julgamos impropriedade realizar uma atividade desta forma. Se escolhêssemos esta alternativa este trabalho abrangeria uma pequena parcela de alunos e professores. Portanto, escolhemos o experimento virtual da dupla fenda com elétrons e fótons para produzir o mesmo resultado final, isto é, demonstrar o comportamento quântico de partículas.

Observando o capítulo 3 conseguimos mostrar as equações no interferência construtiva e interferência destrutiva com muita facilidade e simplicidade. Podemos mostrar o mesmo resultado encontrado quando se realiza a prática experimental sobre a bancada utilizando experimentos virtuais. Portanto, nesta etapa da seção, respondemos a pergunta inicial que cognitivamente alcança-se o mesmo resultado (demonstrar uma lei física) usando experimentos virtuais ou utilizando experimento sobre a bancada.

A segunda assertiva que realizamos é a facilidade da aplicação da atividade experimental. Caso o professor disponha de uma sala de informática⁴ é incontestável a afirmação que realizar atividades experimentais simuladas dispense menos tempo do que realizar atividades sobre a bancada. Não são necessários, por exemplo, materiais além de um computador ou celular. O resultado esperado se obtém com maior facilidade.

Devido ao alcance cognitivo ser o mesmo tanto para simuladores quanto para experimentos sobre a bancada, mas, o experimento virtual possui maior facilidade de aplicação, este argumento colaboraria na predileção do experimento virtual⁵. Este argumento possui a finalidade de destacar que utilizar experimentos virtuais conseqüentemente corrobora com algo a mais: diminuição de tempo no preparo de atividades experimentais.

Enfim, podemos postular:

“O experimento virtual é mais cognitivo que o experimento realizado sobre a bancada”.

Realizamos esta asserção não com o intuito de causar incomodo nos adeptos de atividades sobre a bancada. Nosso objetivo é realizar uma concisa defesa das atividades experimentais virtuais. Partimos deste postulado fazendo uso do pensamento falsificacionista da ciência.

⁴Não utilizamos neste trabalho experimentos virtuais em aparelhos smartphone. Entretanto, para aqueles que não possuem salas de informática esta é uma alternativa devido ao fato da maior parte dos estudantes terem celulares. Por exemplo, na escola de aplicação deste trabalho 93% dos alunos possuíam celular. O link a seguir possui vários experimentos virtuais gratuitos: https://play.google.com/store/search?q=applet%20f%C3%ADsica&hl=pt_BR. Acessado em 05 de novembro de 2015. Experimentos para a plataforma android.

⁵No final da seção anterior propomos qual deve ser a motivação para a escolha entre experimentos “reais” e virtuais.

É esta teoria recentemente proposta um substituto viável para a que é contestada? Em geral uma teoria nova será aceita como digna da consideração dos cientistas se ela for mais falsificável que sua rival, e especialmente se ela prevê um novo tipo de fenômeno não tocado pela rival (CHALMERS, 1993, p. 77).

Na verdade, o experimento virtual é mais cognitivo devido a duas características que expomos a seguir:

1º) é mais simples de observar resultados experimentais no experimento virtual⁶.

2º) atividades experimentais que possuem resultados de difícil cognição, como o experimento virtual da dupla fenda com elétrons e fótons, é mais fácil de compreender fazendo uso de simuladores como fizemos neste trabalho.

A segunda característica é o “novo fenômeno” que Chalmers (1993) destaca. O postulado que propomos ainda possui outra característica científica interessante que diz respeito ao seu grau de falsificabilidade (CHALMERS, 1993):

Uma boa lei ou teoria científica é falsificável porque faz afirmações decisivas sobre o mundo. Para o falsificacionista, quanto mais falsificável for uma teoria melhor ela será, num sentido bem elástico. Quanto mais uma teoria afirma mais oportunidade potencial haverá para mostrar que o mundo de fato não se comporta da maneira como mostrado pela teoria (CHALMERS, 1993, p. 68).

Se o nosso postulado se restringisse apenas a experimentos virtuais utilizados no ensino de física seu grau de falsificabilidade seria baixo. Nosso postulado é uma afirmação para qualquer disciplina que utiliza objetos educacionais digitais devido ao fato de que a afirmação diz respeito a funcionalidade do objeto educacional e não sobre a disciplina utilizada.

⁶Por exemplo: Linhas de campo magnético é muito simples de serem produzidas em atividades sobre a bancada raspando esponja de aço que produz um excesso sobre uma folha de sulfite que possui um ímã em baixo da folha. Sendo assim, segundo os critérios estabelecidos neste trabalho na seção 6.2 deveríamos optar por esta prática. Entretanto, mostrar mais uma imagem difusa que possui por aproximação linhas de indução é o limite desta prática. Para mostrar o comportamento das linhas de indução magnética é muito mais simples e razoável utilizar experimentos virtuais.

Capítulo 7

Resultados e Considerações Finais

Neste capítulo mostraremos os questionários respondidos pelos alunos. Seleccionamos as respostas recorrentes nos questionários. Discutiremos: *i*) possivelmente o que aluno pensou para elaborar sua resposta; *ii*) quais resultados positivos da aplicação e *iii*) o que não foi entendido e estabelecer alguns problemas no questionário. Usamos a nomenclatura X , Y , Z e K , para preservar a identidade dos alunos. Estes quatro alunos seleccionados responderam os três questionários.

Escolhemos especificamente estes quatro alunos pois não houve respostas com grandes diferenças do que aparece nestes questionários, ou seja, o máximo de variação de respostas que aconteceram na aplicação deste projeto está contido em algum dos quatro questionários.

Outro ponto a se destacar se refere ao que possivelmente o aluno pensou. Para realizar este tipo de análise, após a aplicação dos questionários, realizamos rodas de conversa com os estudantes e perguntamos quais os aspectos que conduziram as escolhas realizadas. Portanto, quando escrevemos que possivelmente o aluno entendeu um dado aspecto do questionário ou, o aluno pensou de uma certa forma específica, estamos descrevendo as falas dos estudantes durante a roda de conversa.

7.1 Análise da Aplicação do Questionário 1

Podemos observar na Figura 7.1 que X , e Y não desenharam o anteparo onde chega os projéteis. O desenho de Z e K possuem o anteparo, mas não foi construído com perspectiva. Nesta etapa percebemos que o texto de Feynman *et. al.* (2008) não indica se os orifícios dão equidistantes, se a parede blindada está relativamente perto ou longe do anteparo. Isto justifica porque quase metade da sala desenhou a parede unida ao anteparo.

Já na Figura 7.2 podemos perceber que X entendeu a proposta do questionário e também o experimento. Está resposta é a esperada por nós e está totalmente correta devido o fato do aluno ter escolhido tanto a “sombra” da fenda no anteparo e priorizado a

lateral da sombra (onde realmente há maior probabilidade de os projéteis chegarem). O aluno *Y* pintou metade dentro da sombra e outra metade fora com uma tonalidade mais clara. Acreditamos que o estudante desistiu da resposta inicial (tonalidade mais clara) e optou em pintar dentro da sombra *S*. O aluno *Z* pintou na horizontal. Possivelmente ele pintou o sentido da rajada de balas. O aluno *K* pintou apenas dentro da fenda. Entendemos que este aluno imaginou o anteparo unido com a parede.

Na Figura 7.3 temos exatamente as mesmas respostas que na Figura 7.3 só que pintando dentro da sombra *R*. A Figura 7.4 os alunos pintaram a soma das respostas nas questões 2 e 3 mostradas nas Figuras 7.2 e 7.3. Isto é digno de nota pois demonstramos exatamente este resultado no capítulo 2. A Figura 7.5 apenas um aluno respondeu que diminuiria a probabilidade quando trocamos balas por bolas de gude no experimento da dupla fenda. A questão 6 mostra que está tão arraigado a noção clássica que os alunos não proporão outra resposta. Muitos não entenderam esta questão mostrando uma deficiência no questionário.

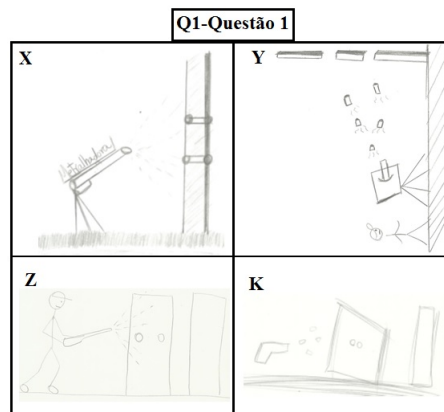


Figura 7.1: Questão 1 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

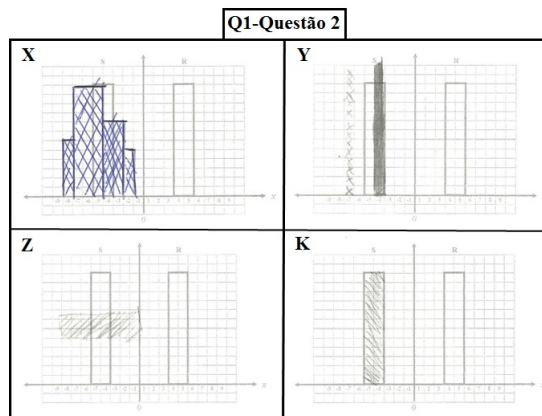


Figura 7.2: Questão 2 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

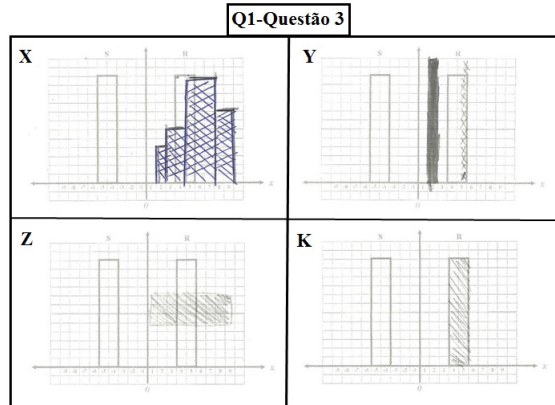


Figura 7.3: Questão 3 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

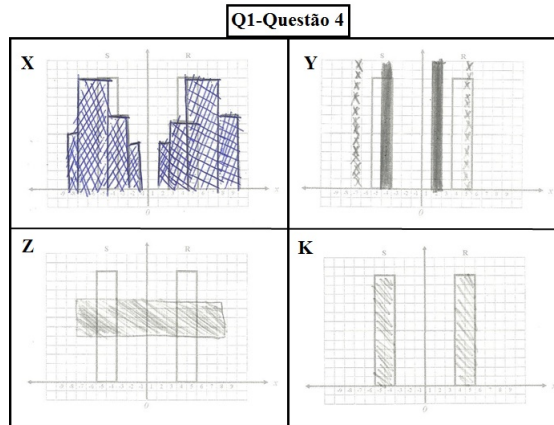


Figura 7.4: Questão 4 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

Q1-Questão 5

X O resultado não sofrerá nenhuma mudança	Y Sim, a largura aumenta proporção
Z ACHO QUE NÃO	K NÃO

Figura 7.5: Questão 5 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

7.2 Análise da Aplicação do Questionário 2

A Figura 7.7 mostra as respostas para a questão 1. Os alunos *X*, *Y* e *Z* entenderam o conceito de interferência pois acertaram a resposta (*Z* apenas colocou o valor numérico sem a amplitude relativa). O estudante *K* confundiu a resposta da parte b possivelmente porque as ondas estavam na parte inferior do gráfico. Entretanto este mesmo estudante acertou a resposta para a interferência destrutiva.

Q1-Questão 6	
X Sim, é possível encontrar outra resposta, mas com pequenas diferenças	Y NÃO ENTENDEI.
Z NÃO NÍ.	K NÃO

Figura 7.6: Questão 6 do questionário 1 respondida por quatro alunos.

Na Figura 7.8, o estudante *X* respondeu (assim como o fez para partículas) mostrando uma queda na intensidade. O aluno *K* respondeu que apenas chegaria água na sombra da fenda. E os alunos *Y* e *Z* desenharam uma onda no anteparo. Ninguém pintou a extremidade inferior do gráfico. Isto deveria ser feito pois a onda difrata e colidi com todo o anteparo. Sendo assim, os estudantes *X* e *K* deram uma resposta de partícula para onda e os estudantes *Y* e *Z* desenharam uma onda para expressar o que chegou no anteparo. Está questão, assim como a questão 3 mostra uma deficiência nesta parte do questionário. Não conseguimos enunciar este problema com clareza. Pensando da mesma forma para a questão 3 os estudantes reproduziram a mesma resposta mudando para a sombra do lado direito (Figura 7.9).

A questão 4 (Figura 7.10) os estudantes demonstraram que entenderam como surge o gráfico de interferência. Com exceção de *K* que pintou as bolinhas com interferência destrutiva, os demais desenharam uma resposta concisa. Os alunos *Y* e *Z* fez curvas assim com suas respostas nas questões 2 e 3. O aluno *X* uniu os pontos e não fez as curvas. Respondeu como se tivesse unindo pontos em uma equação do primeiro grau e não numa equação do segundo grau.

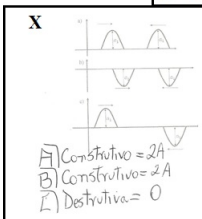
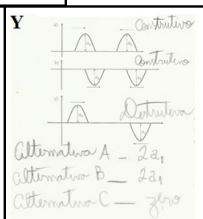
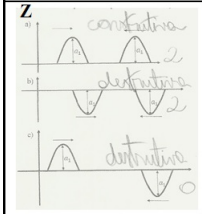
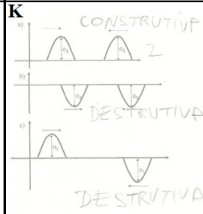
Q2-Questão 1	
X 	Y 
Z 	K 

Figura 7.7: Questão 1 do questionário 2 respondida por quatro alunos.

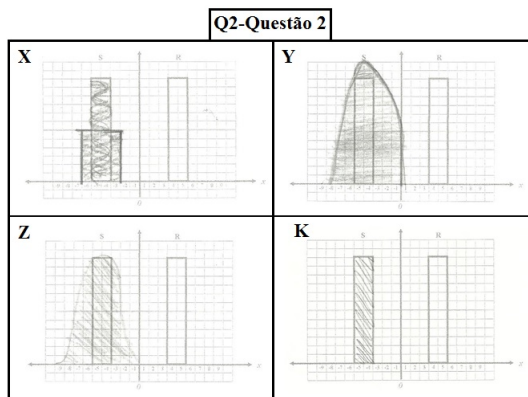


Figura 7.8: Questão 2 do questionário 2 respondida por quatro alunos.

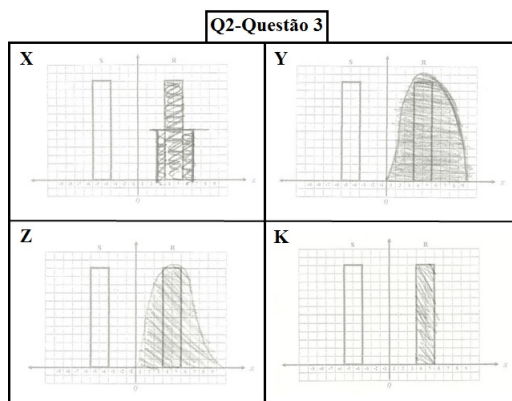


Figura 7.9: Questão 3 do questionário 2 respondida por quatro alunos.

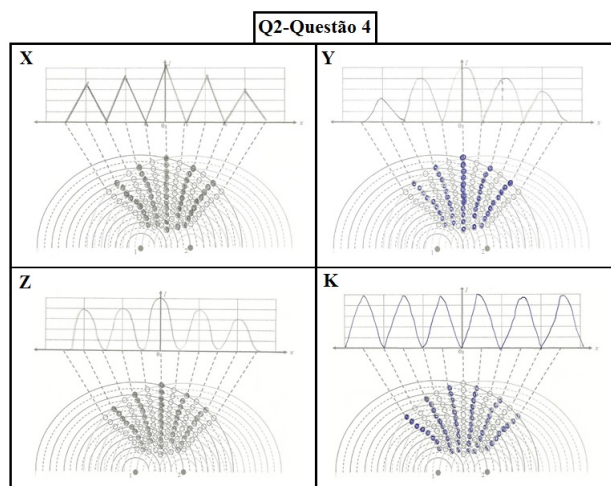


Figura 7.10: Questão 4 do questionário 2 respondida por quatro alunos.

7.3 Análise da Aplicação do Questionário 3

Nas figuras 7.11, 7.12 e 7.13 todos os estudantes responderam que as o elétron se comportaria como partícula. Isto pode ser notado devido a todas as respostas serem

iguais ao do questionário 1. Entretanto, o aluno *Y* deu a mesma resposta. Acreditamos que este aluno não entendeu a proposta deste trabalho.

Quando questionamos os estudantes sobre o elétron se comportar de outra forma todos, exceto *X*, responderam que não. O aluno *Y* disse ainda que o elétron é igual a bala, ou seja, desta forma este estudante entendeu que o comportamento do elétron é igual ao comportamento de partículas clássicas. O aluno *X* (Figura 7.14) percebeu que poderia haver outra resposta devido a existência da pergunta no questionário. Mas não conseguiu propor nada de diferente. Nenhum aluno propôs que o elétron poderia se comportar como onda.

Após aplicação dos questionários percebemos algumas deficiências: *i*) são muito longos; *ii*) a questões 6 do questionário 1 e 4 do questionário 3 ficaram muito vagas impondo dificuldade para o corpo discente responder e *iii*) o sistema de mostrar a sombra da fenda se demonstrou pouco eficiente quando utilizamos ondas. Sendo assim, caso este questionário sejam aplicados, eles precisarão sofrer mudanças que supram as dificuldades elencadas.

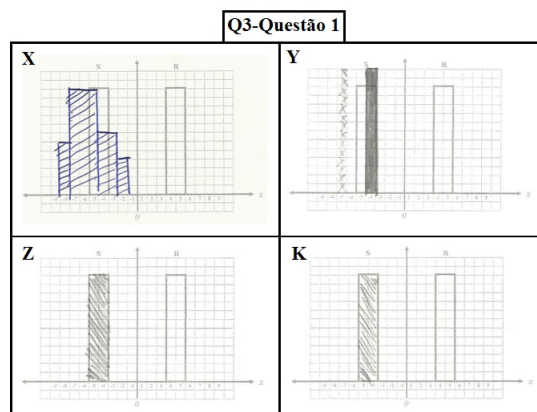


Figura 7.11: Questão 1 do questionário 3 respondida por quatro alunos.

7.4 Experimento Virtual da Dupla Fenda com Projéteis (desenvolvido pelos alunos)

Um grupo de alunos de um curso integrado (ensino médio e informática), do Instituto Federal do Paraná, desenvolveu um simulador¹ utilizando uma linguagem de programação que permite visualizar e entender o comportamento do experimento da dupla fenda com projéteis. A Figura 7.15 representa a tela deste simulador:

¹Solicitamos como trabalho que, no curso integrado do ensino médio com informática, os alunos em grupos construíssem uma simulação referente ao experimento da dupla fenda com partículas.

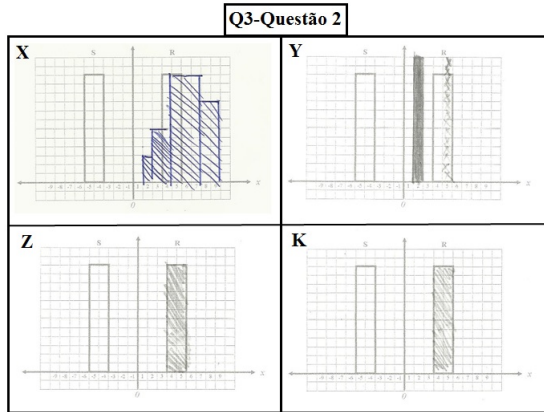


Figura 7.12: Questão 2 do questionário 3 respondida por quatro alunos.

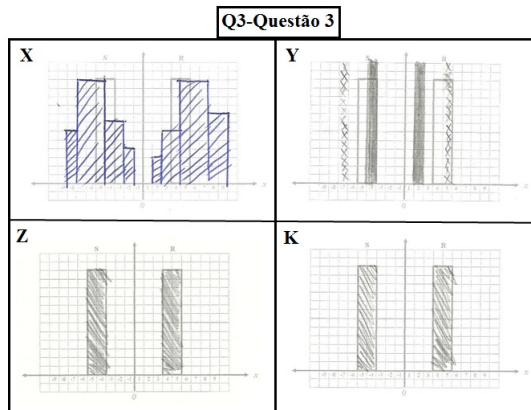


Figura 7.13: Questão 3 do questionário 3 respondida por quatro alunos.

Q3-Questão 4

<p>X Se existe essa pergunta aqui é porque a resposta deve ser sim. Não consigo imaginar outra resposta.</p>	<p>Y NÃO. O ELETRON É IGUAL DA BALA.</p>
<p>Z NÃO</p>	<p>K NÃO</p>

Figura 7.14: Questão 4 do questionário 3 respondida por quatro alunos.

Podemos observar que o experimento virtual possui cinco botões fixos e três funções variáveis. O botão “Play” inicia o experimento virtual com as condições e parâmetros iniciais que podem ser modificados, digitando os valores que usuário desejar. O botão “Pause” interrompe o experimento, mas não muda nenhuma condição inicial e nem o resultado já produzido. Apertando novamente o botão “Play” o experimento volta a funcionar do ponto em que parou. O botão “Reset” reinicia o experimento desde o início,

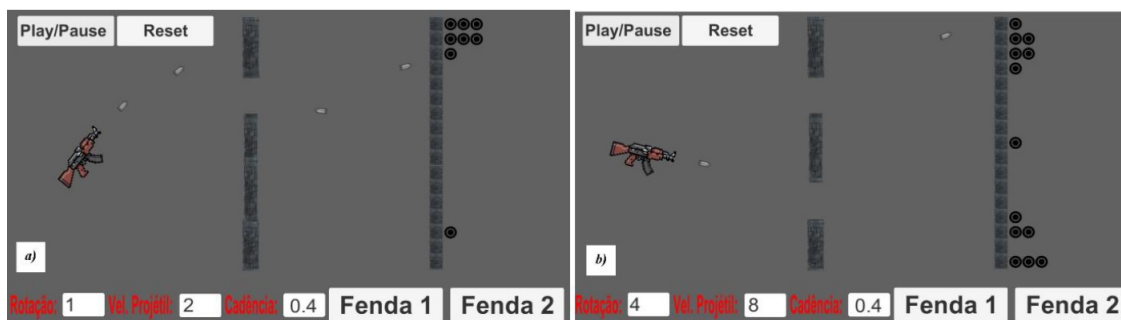


Figura 7.15: Experimento virtual da dupla fenda com partículas desenvolvido por um grupo de alunos do ensino médio. a) fenda 2 está coberta b) as duas fendas estão abertas.

com as condições iniciais Rotação: 1, *Vel. Projétil*: 2, *Cadência*: 0,4 e as duas fendas abertas. O botão “*Reset*” apaga os resultados encontrados no lado direito do simulador.

As funções variáveis são: *i*) Rotação que pode variar de 0 até 25. Com uma rotação 0 a metralhadora não gira sobre o eixo e, conseqüentemente, dispara em linha reta. O alvo que os projéteis atingirão depende exclusivamente para onde a metralhadora está apontada. Por exemplo, se o experimento estava com rotação igual 2 e o botão “*Pause*” foi acionado quando a metralhadora estava posicionada aproximadamente na linha reta da fenda 1, todos os projéteis atravessarão a fenda 1 e atingirão o anteparo. Se o valor da rotação for mudado para 25 a metralhadora fica descontrolada, atirando em todas as direções; *ii*) A função “*Velocidade do Projétil*” pode variar de 0 a 25. Se escolhermos velocidade nula, nenhum projétil saia da metralhadora. Caso utilizemos o parâmetro da velocidade máxima, ou seja, o valor de 25, os projéteis são ejetados com uma velocidade muito alta e o acompanhamento da evolução do experimento fica prejudicado e, *iii*) a função *cadência* também varia de 0 a 25. Quanto menor for a *cadência* maior será a quantidade de projéteis disparados pela metralhadora. Conseqüentemente, a função *cadência* com valor nulo, ejeta inúmeros projéteis de uma única vez.

Podemos verificar que existem os botões “*Fenda 1*” e “*Fenda 2*”. Quando pressionamos o botão “*Fenda 1*”, a fenda superior é tampada ou coberta (ver Figura 7.15a). Do mesmo modo, quando acionamos o botão “*Fenda 2*”, a fenda inferior é obstruída. Conforme as balas chegam no anteparo, aparece um ponto na linha reta imaginária que une a saída da metralhadora ao local do anteparo que foi atingido. Se mais de uma bala chegar no mesmo lugar do anteparo, aparecerá um ponto para cada bala (ver Figura 7.15b). Por fim, as balas podem ricochetear na parede e voltar para trás ou, os projéteis podem colidir com a extremidade da fenda, ricochetear e chegar em algum lugar aleatório.

As limitações deste simulador são: *i*) as curvas de probabilidades não ficam exatamente iguais ao esperado, ou seja, a resposta para o experimento é aproximada fazendo-se necessário ressaltar a resposta na Figura 2; *ii*) no parâmetro “*cadência*” nula não deveria sair nenhuma bala da metralhadora; *iii*) apenas a função *rotação* aparece qual valor máximo

pode ser atribuído a grandeza e ; *iv*) não há unidades para a velocidade do projétil.

No entanto, o experimento é bastante versátil. É possível controlar a rotação da metralhadora, a velocidade dos projéteis, a cadência do fenômeno. Pode-se ainda cobrir a fenda 2 e deixar a fenda 1 aberta ou, realizar o contrário liberando a fenda 2 e cobrindo a fenda 1. Não há uma caixa de areia, mas a probabilidade é medida quando uma bala toca o anteparo, acumula um ponto preto. Nos lugares que há maior densidade de projéteis, há maior acúmulo de pontos pretos. Depois de um tempo, se uma das fendas estiverem abertas ou as duas estiverem abertas, formam-se as imagens de probabilidade da Figura 2.7. Há também os efeitos de ricocheteio dos projéteis, produzindo alguns pontos aleatórios.

7.5 Considerações finais

No primeiro capítulo elencamos o objetivo desta pesquisa de ensinar mecânica quântica no ensino médio. Para tal feito traçamos uma sequência de atividades que deveriam ser realizadas.

A partir do segundo capítulo começa nossa fundamentação teórica construída principalmente sobre o livro *Lições de Física de Feynman – mecânica quântica* (Feynman *et al.*, 2008). Neste capítulo desenvolvemos uma análise utilizando a teoria de probabilidades para explicar o comportamento corpuscular dos projéteis no experimento da dupla fenda.

No terceiro capítulo mostramos algumas potencialidades de experimentos virtuais no ensino de física. Ainda neste capítulo, desenvolvemos um método intuitivo para mostrar o efeito da interferência de ondas no experimento da dupla fenda.

A quarto capítulo exploramos dois experimentos virtuais para mostrar o comportamento quântico de objetos quânticos. Foi possível verificar novas potencialidades do uso de simuladores no ensino de física. Neste capítulo discutimos as duas principais escolas de pensamento filosófico da mecânica quântica. O realismo dualista objetivo discutimos de forma mais profunda realizando uma revisão de artigo sobre assunto. A escola de Copenhague discutimos o princípio da complementariedade.

No quinto capítulo propomos algo que não foi encontrado na literatura do ensino de física no ensino médio, estudar mecânica quântica utilizando vetores de estado. Devido a este fato construímos nosso produto final sobre este capítulo. Com animações em slides² mostramos como se constrói o formalismo matemático da mecânica quântica que é profundamente abstrato.

Já no sexto capítulo discutimos a metodologia do uso de experimentos virtuais no ensino de física. Como o material deste capítulo é escasso na literatura, propomos algumas considerações sobre a metodologia de aplicações de atividades experimentais virtuais no ensino de física.

²Da forma como está em nosso produto final.

O nosso sétimo capítulo contém as respostas os questionários desenvolvidos para a aplicação deste trabalho. Colhemos por amostragem as respostas mais recorrentes e analisamos os possíveis pensamentos dos alunos em cada etapa desta pesquisa.

Pudemos notar que após a aplicação deste trabalho: 1) os alunos durante as avaliações escreveram respostas mais detalhadas; 2) Muitos estudantes tentaram responder questões usando lógica e dialogando ao invés de puramente utilizar fórmulas e 3) interesse e atenção nas aulas de física aumentou.

Nosso objetivo inicial foi ensinar o comportamento de objetos quânticos. Este comportamento é restrito a partículas subatômicas. Sendo assim não faz parte da observação direta do humano. Desta forma, fundamentos a importância deste trabalho reconhecendo que muito da tecnologia atual³ foi desenvolvida graças a evolução da mecânica quântica.

Escolhemos o experimento da dupla fenda devido ao silogismo que ele provoca:

1. As partículas clássicas não interferem.
2. O elétron é uma partícula.

Sendo assim é natural concluir:

3. O elétron não interfere.

O silogismo não está errado. Mas a experiência mostra a interferência de elétrons quando não observados por algum instrumento. Assim como Feynman *et. al.* (2008) entendemos que neste fato reside o que a de mais misterioso na física quântica. Não respondemos, assim como Feynman o fez, porque o elétron interfere, simplesmente⁴, mostramos da forma mais elementar (ao nosso ver) a interferência dos elétrons.

Enfim, acreditamos ter alcançado os objetivos iniciais desta pesquisa. Este trabalho é para todos que gostam verdadeiramente de física.

³Novas tecnologias que utilizam a física quântica são: desde microscópios eletrônicos, nanotecnologia, computação quântica, semicondutores, diodos (incluindo o LED), transistores, computadores, tablets, GPS, satélites, radares, aviões, lasers, scanners de código de barras, sistemas militares de defesa, CD e Blu-Ray players, criptografia, células fotoelétricas, sensores diversos, basicamente, tudo que é eletrônico.

⁴De Broglie explica a interferência dos elétrons com seus postulados que mostram o comportamento ondulatório de partículas através de características de ondas como frequência e número de onda.

Referências Bibliográficas

BACHELARD, G. **O novo espírito científico – Coleção os pensadores**. São Paulo: Abril Cultura. 1984.

BAPTISTA, D. M. T. **O debate sobre o uso de técnicas qualitativas e quantitativas de pesquisa**. In: Martinelli, Maria Lúcia (Org.). Pesquisa qualitativa: um instigante desafio. São Paulo: Veras editora. 1999.

BASTOS FILHO, J. B. Os problemas epistemológicos da realidade, da compreensibilidade e da causalidade na teoria quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.25, n. 2, p. 125-147, 2003.

———. Causalidade, (in)determinismo e (im)previsibilidade. Por que o conceito de causa é tão importante. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.30, n. 3, p. 3304-1 a 3304-12, 2008.

———. O experimento da dupla fenda como exemplo de incognoscibilidade? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.15, n. 1 a 4, p. 153, 1993.

BOÂS, N. V., DOCA, R. H., GUALTER, G. J. **Física - volume 3**, 1ª ed. – São Paulo: 2010.

BOGDAN, R., BIKLEN, S. **Investigação Qualitativa em Educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Porto: Porto Editora, 1994.

BRASIL. PNLD 2015: **Física: ensino médio**. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2014.

———. Ministério da Educação, Secretaria da Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio**, Brasília, MEC/SEMT, 1999.

BRENNAN, R. **Gigantes da Física**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1998.

CALÇADA, C. S., SAMPAIO, J. L. **Física – Volume Único**. 1ª ed., Atual, São Paulo, 2001.

———. SAMPAIO, J. L. **Física Clássica - Eletricidade**. 2ª ed., Atual, São Paulo, 2000.

CAMPOS, H. S. Uma abordagem sobre a irracionalidade da realidade no problema da observação. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v. 18, n. 3, p. 372-389, 2001.

CARRON, W., GUIMARÃES, O. **As faces da Física**, 2ª ed., Moderna, São Paulo, 2002.

CAVALCANTE, M. A., TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. **Cad. Brás. Ens. Fís.**, v. 19, n. 2, p. 191-207, 2002.

CHALMERS, A. F. **O que é ciência afinal?** 1. ed. São Paulo: Brasiliense. 1993.

CHESMAN, C., ANDRÉ, C., MACÊDO, A. **Física moderna – Experimental e aplicada**, 1ª ed., Livraria da Física, São Paulo, 2004.

CHIBENI, S. S. **Problemas em realismo com mecânica quântica – uma análise de resultados recentes**. Dissertação em Física – Instituto “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp: Campinas. 1984. 142 p.

———. **Aspectos da descrição física da realidade**. Tese em Filosofia – Departamento de Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp: Campinas. 1993. 184 p.

COHEN-TANNOUJJI, C., DIU, B., LALOË, F. **Quantum Mechanics**. vol. I, John Wiley & Sons: New York. 1977

COLEÇÃO CLÁSSICOS DA CIÊNCIA. **O ano miraculoso de Einstein**, UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

CROTTY, M. **The Foundations of social research: meaning and perspective in the research process**. Londres: Sage, 1998.

DICKE, R.H., WITTKE, J.P. **Introduction to Quantum Mechanics**. Massachusetts: Addison-Wesley Company. Inc. 1961.

EINSTEIN, A., INFELD, L. **A evolução da Física**. Rio de Janeiro: Zahar. 2008.

———. **Teoria da Relatividade Especial e Geral**, São Paulo, Empório do livro, 1999.

———. **O significado da Relatividade**, São Paulo, Gradiva, 2003.

EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 3ª ed., Campus, Rio de Janeiro, 1985.

FERREIRA, D. C., SOUZA FILHO, M. P. Pesquisa e Formação de Professores: políticas e programas. Uma proposta de metodologia do uso de experimentos virtuais no ensino de física. In: **Anais do V CBE - Congresso Brasileiro de Educação**, São Paulo, FC/UNESP-Bauru, 2015. Disponível em: <http://li327-81.members.linode.com:8080/vcbe-anais/api/arquivo/16950.pdf>. Acesso em 22/09/2015.

FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. **The Feynman: Lectures on Physics**. v. 1. Massachusetts: Addison-Wesley Company, Inc., 1963.

———. **Lições de Física de Feynman – Mecânica Quântica**. vol. 3. Porto Alegre. Bookman, 2008.

FONTES, L. M. N. **A noção de causalidade final na filosofia da natureza de Aristóteles**. Dissertação em Filosofia – Departamento de Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp: Campinas. 2005. 115 p.

GABASSA, V. **Comunidades de Aprendizagem: A construção da dialogicidade na sala de aula**. 2009. Tese (Doutorado em Educação) – Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

GAMOW, G. **O incrível mundo da física moderna**, IBRASA, São Paulo, 1980.

GASIOROWICZ, S. **Física Quântica**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1979.

GASPAR, A. **Física: Eletromagnetismo e física moderna**. 1ª ed., São Paulo, Ática, 2007.

GEORGIU, A. **Thought experiments in physics problem-solving: on intuition and imagistic simulation**. 2005. University of Cambridge. 2005.

GRAF. **Física 3 – Eletromagnetismo**, Edusp, São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, G. M. **Não-localidade em sistemas quânticos**. Dissertação em Física – Instituto de Física, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2012. 87 p.

HABERMAS, J. **Teoría de La acción comunicativa: Racionalidad de la acción y racionalización social**. v. 1. Buenos Aires: Taurus, 1987.

HALLIDAY, R., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física** - vol. 4, 7ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2007.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 9ª ed., Bookman, 2002.

KIOURANIS, N. M. M. **Experimentos mentais no ensino de ciências: implementação de uma sequência didática**. 2009. Tese (Doutorado em Educação) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Faculdade ciências da Universidade Estadual Paulista. Bauru. 313 p.

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

LEITE, P. K. A causalidade e teoria quântica. **Scientiae e studia**. v. 10, n. 1, p. 165-177, 2012.

LIMA, Telma C. S. de; MIOTO, Regina C. T. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. **Revista Katál**, Florianópolis, v. 10 n. especial, p. 37-45, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S141449802007000300004&script=sci_abstract&tlng=e. Acesso em: 03 fev. 2011.

LOPES, J. L. **Do átomo pré-socrático às partículas elementares: a estrutura quântica da matéria**. Rio de Janeiro: UFRJ. 1992.

LÜDKE, M., CRUZ, G.B. Aproximando universidade e escola da educação básica pela pesquisa. **Cadernos de Pesquisa**, São Paulo, v. 35. n. 125, p. 811-909, maio/ ago. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cp/v35n125/a0635125.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2011.

MAHON, J. R. P. **Mecânica Quântica: desenvolvimento contemporâneo com aplicações**. Rio de Janeiro: LTC. 2011.

MATTHEWS, M. R. Historia, filosofia y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. **Enseñanza de las ciencias**, v. 12, n. 2, p. 255-277, 1994.

MARIO, De M. La evaluación de programas sociales: fundamentos y enfoques teóricos. **Revista de Investigación Educativa**. Barcelona, v. 18. n. 2, p. 289-317, 2000.

MERZBACHER, E. **Quantum Mechanics**. John Wiley & Sons: New York. 1997.

MION, R. A., ANGOTTI, J. A. P. Em busca de um perfil epistemológico para a prática educacional em educação em ciências. **Ciência e Educação**, v.11, n. 2, p. 165-180, 2005.

MOKROSS, B. J. Não-localidade na mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.19, n. 1, p. 136-151, 1997.

NEVES, M. C. D. A causalidade e a perspectiva fenomenológica. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v. 8, n. 1, p. 20-36, 1991.

NUSSENZVEIG, H. M. **Física Básica – Ótica, Relatividade e Física Quântica**, vol. 4., Blucher, São Paulo, 1998.

———. **Curso de Física Básica – Eletromagnetismo** - vol. 3, 1ª ed, Blucher, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, L. M. R. **A significação filosófica da física moderna: temas controversos, conflito de enfoques**. Dissertação em Educação. Departamento de Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp: Campinas. 1995. 91 p.

OLIVEIRA, M. M. M. **Como fazer pesquisa qualitativa**. Recife: Ed. Bagaço. 2005.

PADUA, E. M. M. **Metodologia da pesquisa: abordagem teórico-prática**. 2. ed. Campinas: Papirus, 1997.

PATY, M. A noção de determinismo na física e seus limites. **Scientiae e studia**. v. 2, n. 4, p. 465-492, 2004.

PEDUZZI, L. O. Q. Física e filosofia: uma aproximação através de um texto na disciplina estrutura da matéria. Trabalho apresentado oralmente no **I Encontro Iberoamericano de Investigación en Educación en Ciencias**, Burgos, España, 18 a 21 de setembro 2002.

PESSOA Jr., O. **Conceitos de Física Quântica**. vol. 1. São Paulo: Livraria da Física. 2003.

PINTO, A. C., ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

PONCZEK, R. L. Pode a física ser um bom árbitro para questões epistemológicas? **Cad. Brás. Ens. Fís.**, v. 26, n. 2, p. 295-313, 2009.

REIS, J. C., BRAGA, M., GUERRA, A., FREITAS, J. **Einstein e o Universo relativístico**, Saraiva, São Paulo, 2002.

RESNICK, R. **Introdução à Relatividade Especial**, Polígono, São Paulo, 1971.

SECRETÁRIA DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Caderno do aluno ensino médio – 3ª série**, volume 3 – 2010, São Paulo 2010.

———. **Caderno do aluno ensino médio – 3ª série**, volume 4 – 2010, São Paulo 2010.

SORENSEN, R. A. **Thought experiments**. Oxford: New York, 1992. Rio de Janeiro, 1979.

SUÁREZ, M. Procesos causales, realismo y mecânica cuántica. **Enrahonar**, v. 37, n. 1, p. 141-168, 2005.

TAVARES, A. D., SANTIAGO, A. J., AZEVEDO C. A., GONÇALVES, R. A. Cordas vibrantes como introdução à realidade quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.11, n. 1, p. 49-65, 1989.

TIPLER, P. A., LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2001.

TORRES, C. M. A. **Física: ciência e tecnologia**, Moderna, São Paulo, 2001.

WOLFF, J. F. S. **O ensino da Teoria da Relatividade no ensino Médio: uma abordagem histórica e conceitual**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2005.

Apêndice A

Produto Final

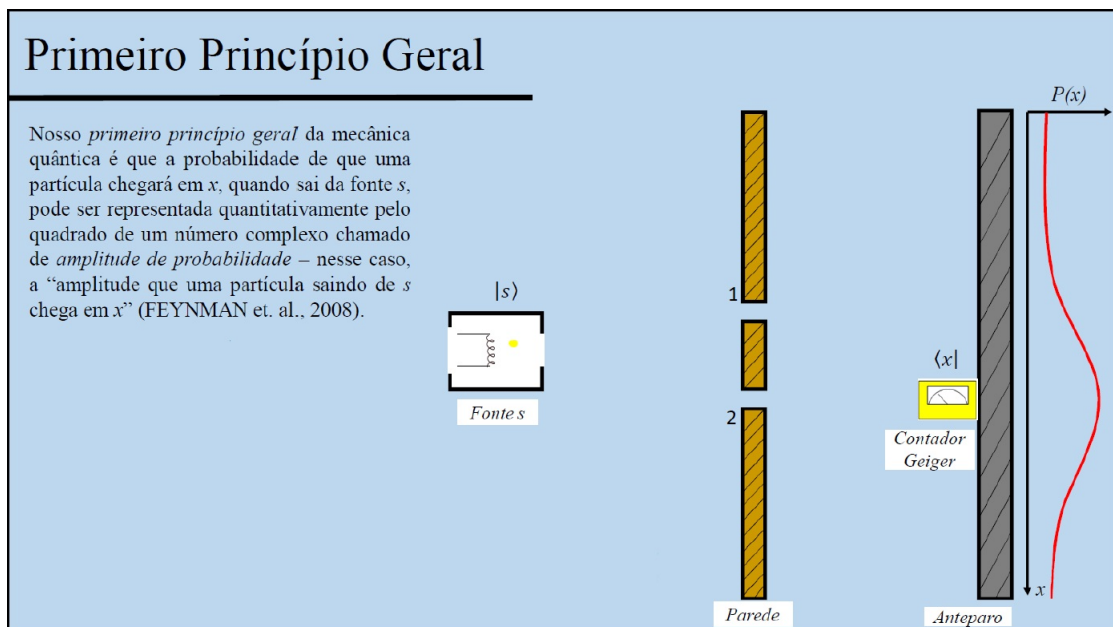


Figura A.1: Slide 1 do Produto Final

Segundo Princípio Geral

segundo princípio geral da mecânica quântica, quando uma partícula pode alcançar um certo estado por duas rotas possíveis, a amplitude total para o processo é a *soma das amplitudes* para cada rota separadamente (FEYNMAN et. al., 2008).

$\langle x|s\rangle_{\text{ambos orifícios abertos}}$

Fonte $|s\rangle$

Parede

Anteparo

Contador Geiger $\langle x|$

$P(x)$

x

Figura A.2: Slide 2 do Produto Final

Terceiro Princípio Geral

Agora podemos escrever com mais detalhes o que podemos dizer sobre a amplitude para o processo no qual o elétron chega em x pelo orifício 1. Podemos fazer isto usando o nosso *terceiro princípio geral*: quando uma partícula vai por alguma rota particular a amplitude para aquela rota pode ser escrita como o *produto* da *amplitude* para ir parte do caminho com a *amplitude* de ir o restante (FEYNMAN et. al., 2008).

Utilizando o segundo princípio geral podemos somar as duas equações para enfim escrever:

$$\langle x|s\rangle_{\text{ambos}} = \langle x|F_1\rangle\langle F_1|s\rangle + \langle x|F_2\rangle\langle F_2|s\rangle$$

Fonte $|s\rangle$

Parede

Anteparo

Contador Geiger $\langle x|$

$P(x)$

x

saida $\rightarrow |s\rangle$

chegada $\rightarrow \langle F_1|$

saida $\rightarrow |F_1\rangle$

chegada $\rightarrow \langle x|$

saida $\rightarrow |s\rangle$

chegada $\rightarrow \langle F_2|$

saida $\rightarrow |F_2\rangle$

chegada $\rightarrow \langle x|$

Figura A.3: Slide 3 do Produto Final

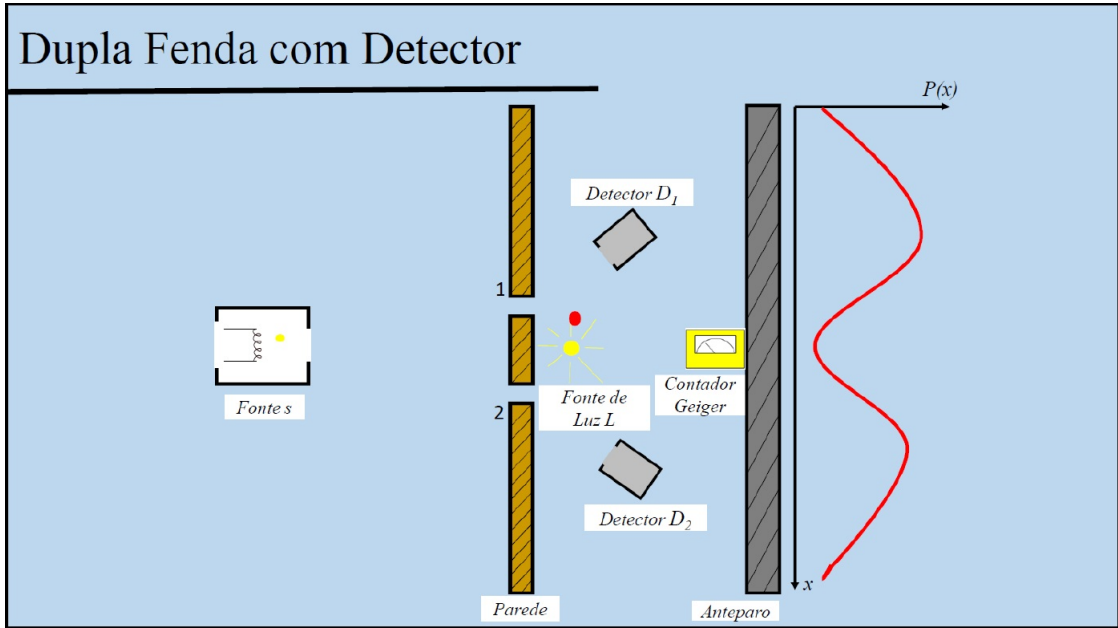


Figura A.4: Slide 4 do Produto Final

Dupla Fenda com Detector

Sejam ϕ_1 a amplitude para o elétron chegar em x pelo orifício 1, ou seja:

$$\phi_1 = \langle x|F_1\rangle\langle F_1|s\rangle$$

e ϕ_2 a amplitude para o elétron chegar no detector através do orifício 2, isto é:

$$\phi_2 = \langle x|F_2\rangle\langle F_2|s\rangle$$

Amplitude	Descrição da Amplitude
$\langle F_1 s\rangle$	elétron vai da fonte s para o orifício 1
a	elétron no orifício 1 espalha um fóton no detector D_1
$\langle x F_1\rangle$	elétron vai da fenda 1 para o detector de elétron em x

A amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 1 e espalha um fóton em D_1 é então:

$$\langle x|F_1\rangle a \langle F_1|s\rangle = a\phi_1$$

Amplitude	Descrição da Amplitude
$\langle F_2 s\rangle$	elétron vai da fonte s para o orifício 2
b	elétron no orifício 2 espalha um fóton no detector D_1
$\langle x F_2\rangle$	elétron vai da fenda 2 para o detector de elétron em x

A amplitude para que o elétron vai de s para x via fenda 2 e espalha um fóton em D_1 é

$$\langle x|F_2\rangle b \langle F_2|s\rangle = b\phi_2$$

Figura A.5: Slide 5 do Produto Final

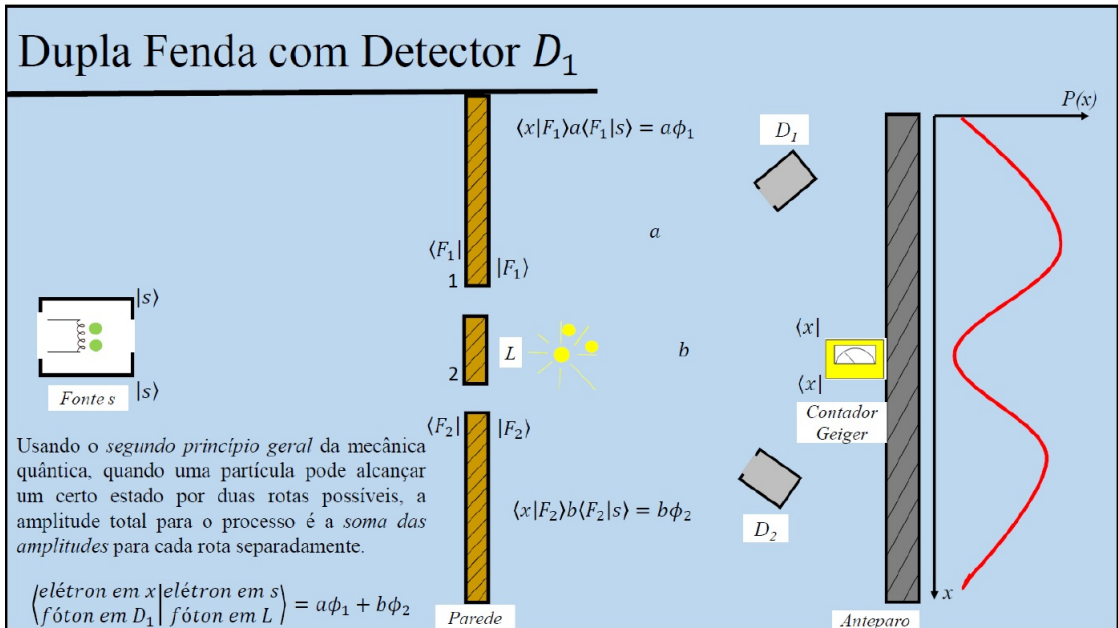


Figura A.6: Slide 6 do Produto Final

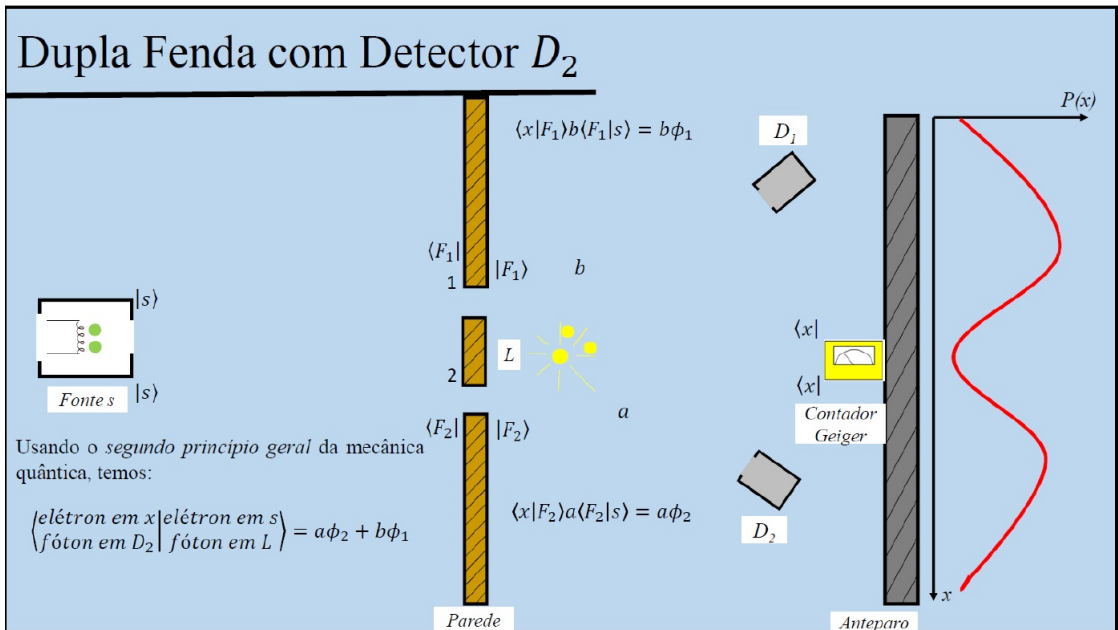


Figura A.7: Slide 7 do Produto Final

Exemplo 1

Qual a probabilidade de obtermos contagem no detector D_1 e um elétron em x ?

Resposta:

Utilizando o primeiro princípio geral temos que a probabilidade é o quadrado da amplitude de probabilidade

$$P(x) = |\langle x|s \rangle|^2$$

para elétrons em x e fótons no detector D_1 foi visto que a amplitude de probabilidade é:

$$\langle \text{elétron em } x | \text{elétron em } s \rangle = a\phi_1 + b\phi_2$$

Assim,

$$P(x) = \left| \langle \text{elétron em } x | \text{elétron em } s \rangle \right|^2 = |a\phi_1 + b\phi_2|^2$$

$$P(x) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2$$

Figura A.8: Slide 8 do Produto Final

Exemplo 2

Na situação anterior se cobrimos a fenda 2 qual a probabilidade de detecção para elétrons em x e fótons no detector D_1 ?

Resposta:

Se cobrimos a fenda 2 consequentemente os elétrons passaram apenas pela fenda 1, ou seja, a amplitude de probabilidade será:

$$\langle x|F_1 \rangle a \langle F_1|s \rangle = a\phi_1$$

utilizando o primeiro princípio geral teremos

$$P(x) = |a\phi_1|^2 = |a|^2 |\phi_1|^2 \quad \therefore \quad P(x) = |a|^2 |\phi_1|^2$$

Este resultado é equivalente para o caso em que $b = 0$, isto é, quando os fótons interagem fracamente com os elétrons que passa pela fenda 2. O gráfico desta situação é parecido com o gráfico para partículas clássicas:

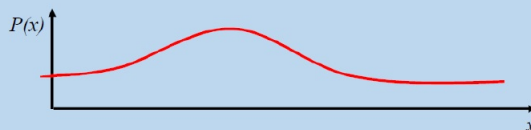


Figura A.9: Slide 9 do Produto Final

Exemplo 3

Ainda na situação do exemplo 1 se o comprimento de onda do fóton é muito longo, o espalhamento atrás do orifício 2 em D_1 deve ser quase o mesmo que o espalhamento atrás do orifício 1 em D_1 , ou seja, $a \approx b$. Utilize a aproximação $a = b$ e determine a probabilidade de detecção de elétrons em x e fótons no detector D_1 ? Com este resultado discuta se o comportamento do elétrons é clássico ou quântico (interferência).

Resposta:

A probabilidade de detecção de elétrons em x e fótons no detector D_1 foi determinada no exemplo 1,

$$P(x) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2$$

utilizando a aproximação $a = b$, temos:

$$P(x) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2 = |a\phi_1 + a\phi_2|^2 = |a|^2 |\phi_1 + \phi_2|^2$$

$$\therefore P(x) = |a|^2 |\phi_1 + \phi_2|^2$$

este resultado mostra que haverá interferência. Sendo assim o comportamento é quântico quando o aparelho de detecção não consegue distinguir por qual fenda o elétron passou. No exemplo 2, o elétron apenas podia passar pela fenda 1, logo, seu comportamento foi clássico

Figura A.10: Slide 10 do Produto Final

Exemplo 4

Qual a amplitude que um elétron chegue em x , independentemente se os fótons foram contados em D_1 ou D_2 ?

Observações:

- (i) Nunca se deve somar amplitudes de estados finais diferentes e distintos.
- (ii) Apenas se soma amplitudes para diferentes alternativas indistinguíveis dentro do experimento, antes que termine o processo.

Resposta:

$$P(x) = \left| \left\langle \begin{matrix} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_1 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{matrix} \right\rangle \right|^2 + \left| \left\langle \begin{matrix} \text{elétron em } x \\ \text{fóton em } D_2 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \text{elétron em } s \\ \text{fóton em } L \end{matrix} \right\rangle \right|^2$$
$$= |a\phi_1 + b\phi_2|^2 + |a\phi_1 + b\phi_2|^2$$

$$P(x) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2 + |a\phi_1 + b\phi_2|^2$$

Figura A.11: Slide 11 do Produto Final

Exercícios

Para o resultado do exemplo 4

$$P(x) = |a\phi_1 + b\phi_2|^2 + |a\phi_1 - b\phi_2|^2$$

Responda quais situações o comportamento da partícula é clássico quais situações o comportamento é quântico. Justifique sua resposta:

- 1) No caso em que $b = 0$.
- 2) No caso em que $a = b$.
- 3) No caso em a fenda 2 é tampada, ou seja, $\phi_2 = 0$.

Respostas:

- 1) comportamento clássico.
- 2) comportamento quântico.
- 3) comportamento clássico.

Figura A.12: Slide 12 do Produto Final

Apêndice B

Amostragem do Questionário 1

Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

O cientista norte americano Feynman e colaboradores propôs em uma aula de física na década de 60 o seguinte experimento mental: "Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai "absorver" os projéteis que a atingirem"

Questão 1 – No quadro abaixo reproduza através de uma figura o experimento proposto por Feynman e colaboradores:

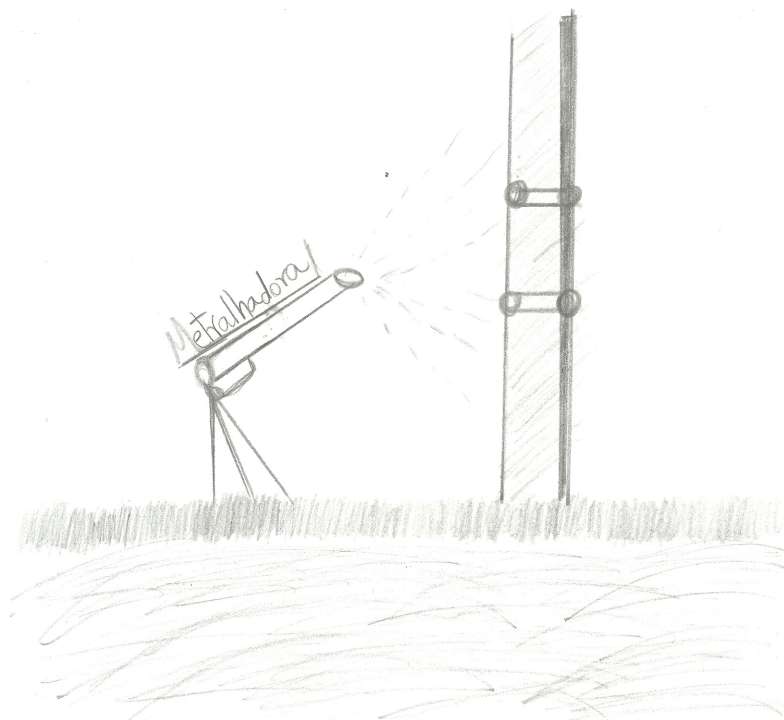
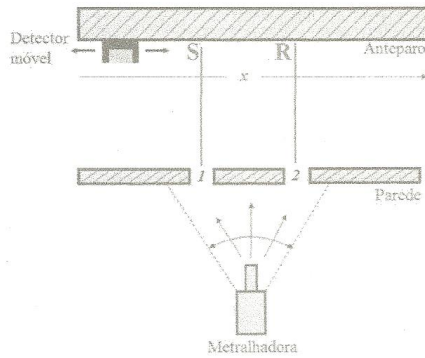


Figura B.1: Questão 1 - Aluno aleatório I

Observe a imagem a seguir que mostra o experimento da dupla fenda numa visão superior

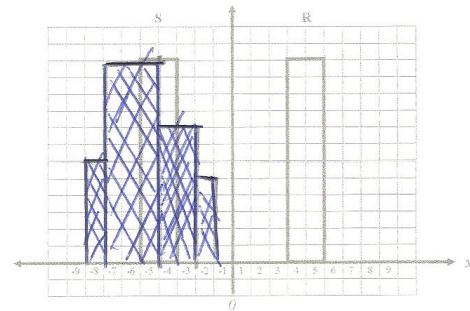


Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis.
 Observe que $x = 0$ está alinhado com o centro da metralhadora quando a mesma está perpendicular a parede. As letras S e R representam respectivamente as direções dos orifícios 1 e 2, isto é, as sombras destes orifícios nas paredes.

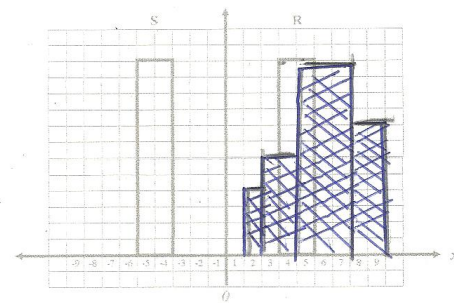
Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição -8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura

abaixo, qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



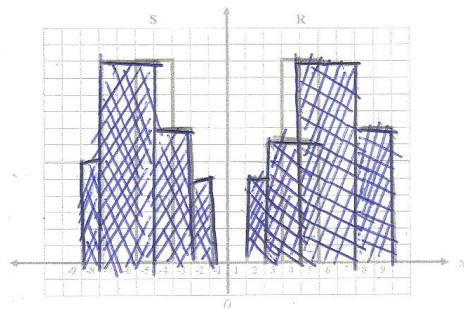
Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 4 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem de projéteis. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis,

Figura B.2: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório I

pinte na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 5 – Caso seja trocado projéteis por bolas de gude, o resultado do experimento mental sofreria alguma mudança?

O resultado não sofrerá nenhuma mudança

Questão 6 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

Sim, é possível encontrar outra resposta mas com pequenas diferenças

Figura B.3: Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório I

Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

O cientista norte americano Feynman e colaboradores propôs em uma aula de física na década de 60 o seguinte experimento mental: “Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai “absorver” os projéteis que a atingirem”

Questão 1 – No quadro abaixo reproduza através de uma figura o experimento proposto por Feynman e colaboradores:

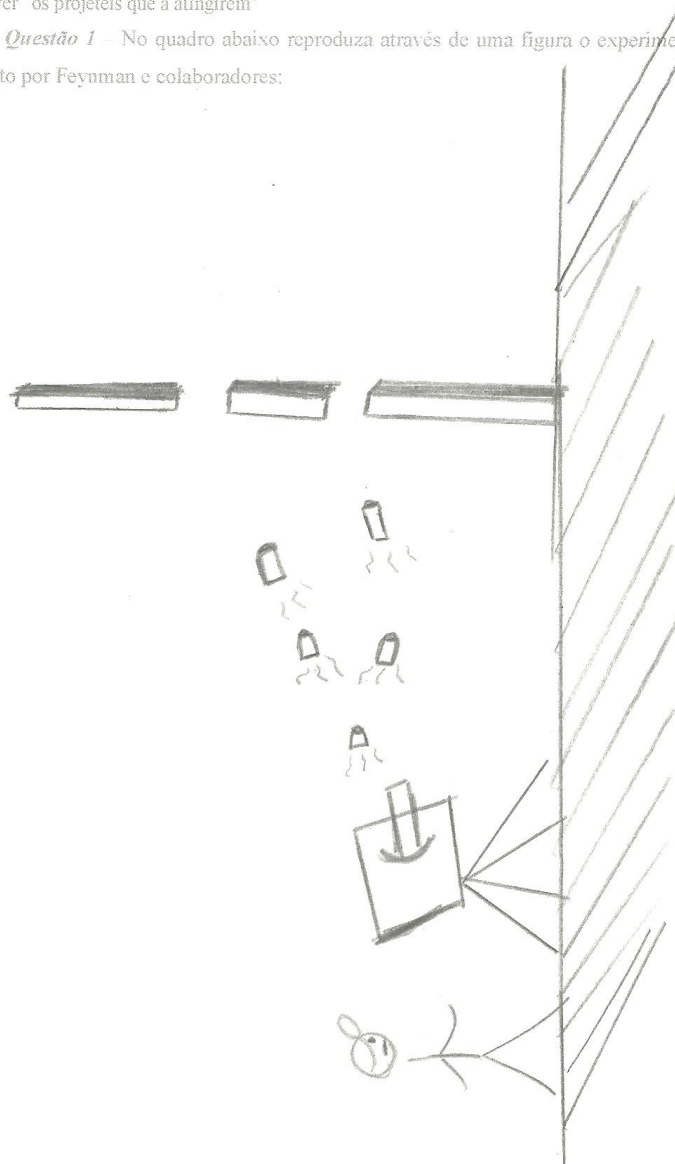
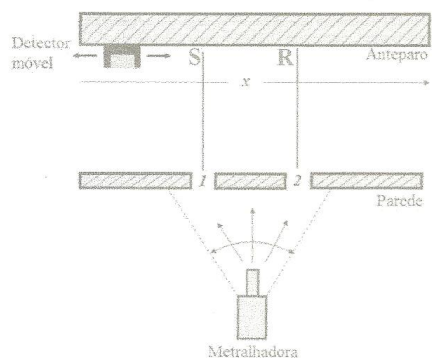


Figura B.4: Questão 1 - Aluno aleatório II

Observe a imagem a seguir que mostra o experimento da dupla fenda numa visão superior

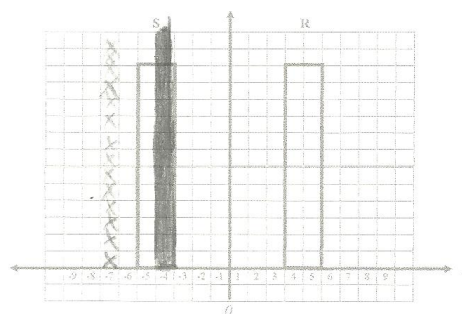


Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis.
 Observe que $x = 0$ está alinhado com o centro da metralhadora quando a mesma está perpendicular a parede. As letras S e R representam respectivamente as direções dos orifícios 1 e 2, isto é, as sombras destes orifícios nas paredes.

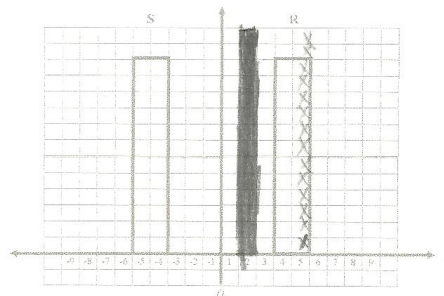
Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição -8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura

abaixo, qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



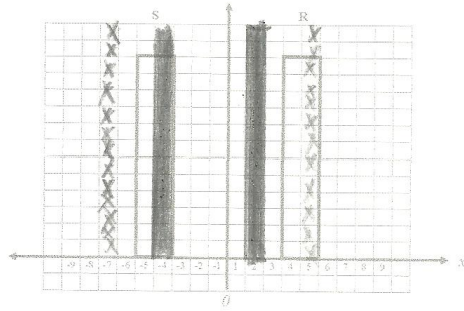
Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 4 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem de projéteis. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis,

Figura B.5: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório II

pinte na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 5 – Caso seja trocado projéteis por bolas de gude, o resultado do experimento mental sofreria alguma mudança?

NAO

Questão 6 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

NAO ENTENDEI.

Figura B.6: Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório II

Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

O cientista norte americano Feynman e colaboradores propôs em uma aula de física na década de 60 o seguinte experimento mental: “Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai “absorver” os projéteis que a atingirem”

Questão 1 – No quadro abaixo reproduza através de uma figura o experimento proposto por Feynman e colaboradores:

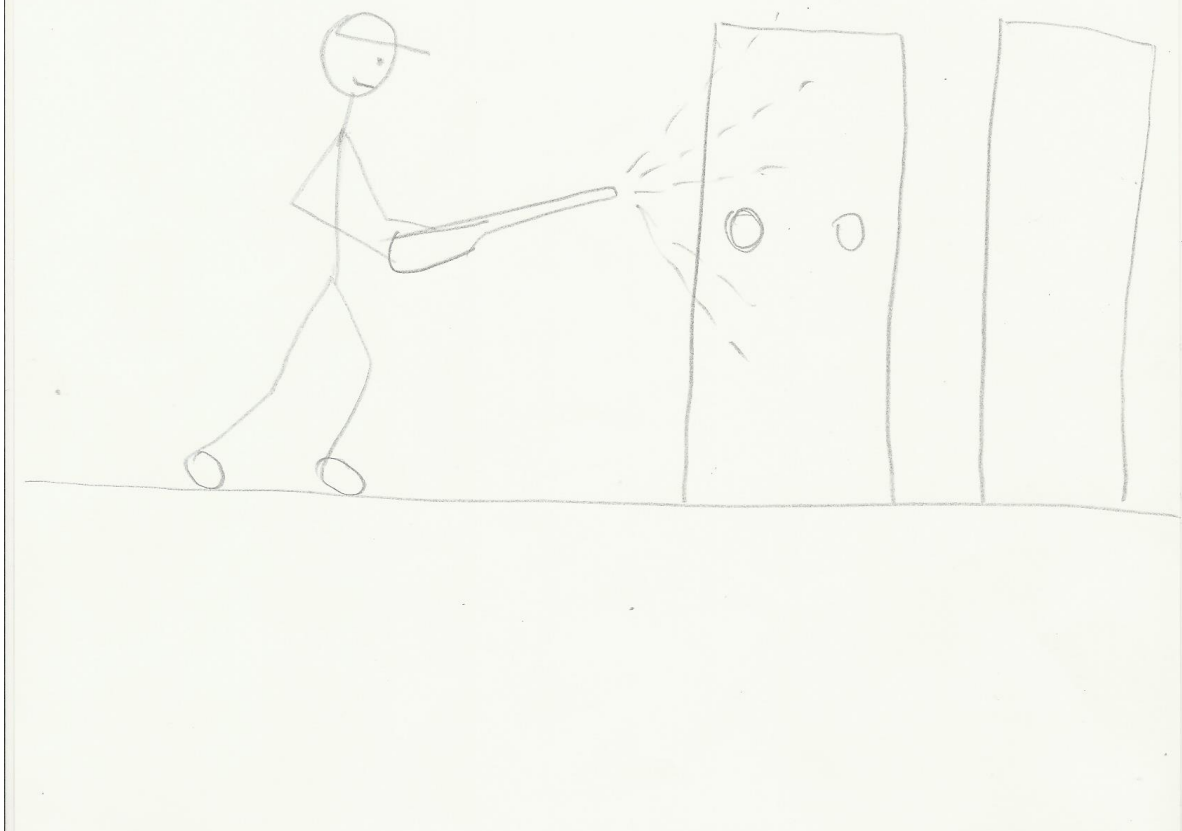
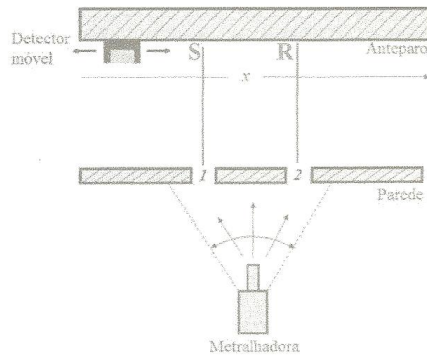


Figura B.7: Questão 1 - Aluno aleatório III

Observe a imagem a seguir que mostra o experimento da dupla fenda numa visão superior

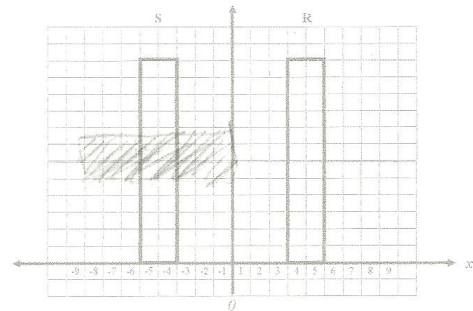


Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis.
 Observe que $x = 0$ está alinhado com o centro da metralhadora quando a mesma está perpendicular à parede. As letras S e R representam respectivamente as direções dos orifícios 1 e 2, isto é, as sombras destes orifícios nas paredes.

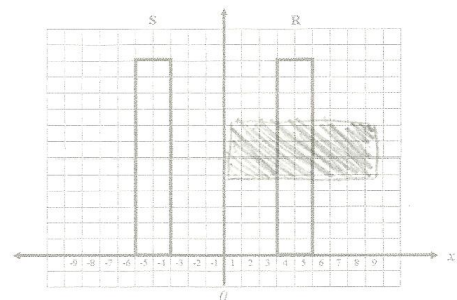
Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura

abaixo, qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



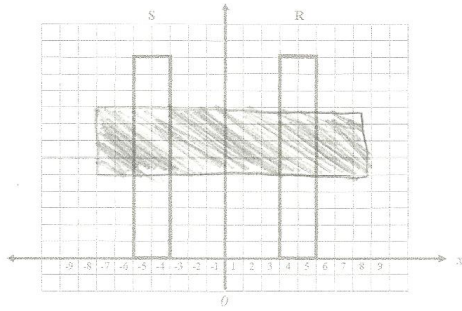
Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 4 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem de projéteis. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis,

Figura B.8: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório III

pinte na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 5 – Caso seja trocado projéteis por bolas de gude, o resultado do experimento mental sofreria alguma mudança?

Sim, Legaria menos
trabalho.

Questão 6 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

Não.

Figura B.9: Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório III

Questionário 1 – Partículas no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

O cientista norte americano Feynman e colaboradores propôs em uma aula de física na década de 60 o seguinte experimento mental: “Temos uma metralhadora que atira uma sequência de projéteis. Não é uma boa metralhadora, pois atira os projéteis em uma varredura de ângulo muito amplo, como mostrado na figura. Na frente da metralhadora existe uma parede (feita com uma placa blindada) que tem dois orifícios que são suficientemente grandes para deixar passar um projétil. Após a parede existe um anteparo (digamos uma parede grossa de madeira) que vai “absorver” os projéteis que a atingirem”

Questão 1 – No quadro abaixo reproduza através de uma figura o experimento proposto por Feynman e colaboradores:

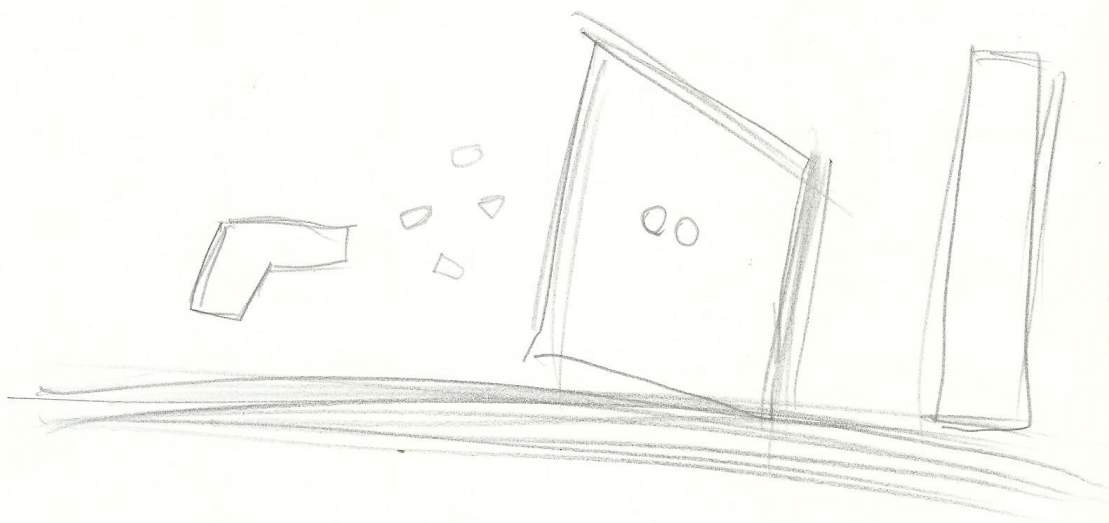
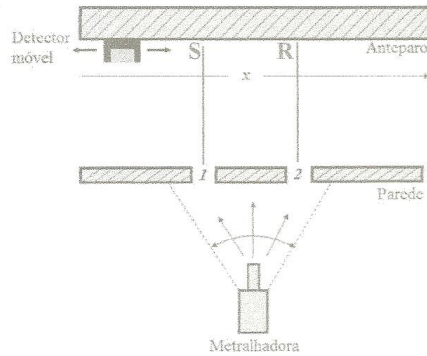


Figura B.10: Questão 1 - Aluno aleatório IV

Observe a imagem a seguir que mostra o experimento da dupla fenda numa visão superior

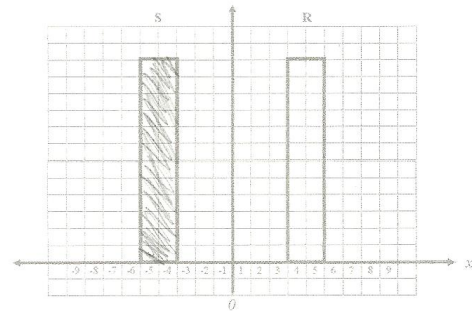


Experimento de Feynman e colaboradores usando projéteis. Observe que $x = 0$ está alinhado com o centro da metralhadora quando a mesma está perpendicular a parede. As letras S e R representam respectivamente as direções dos orifícios 1 e 2, isto é, as sombras destes orifícios nas paredes.

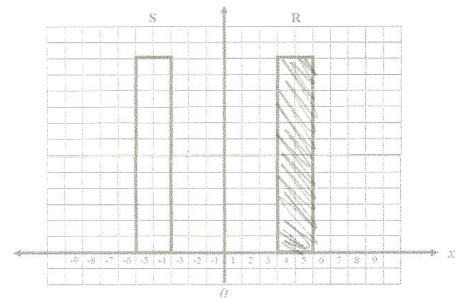
Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o projétil chegue, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as balas chegarão.

Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura

abaixo, qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



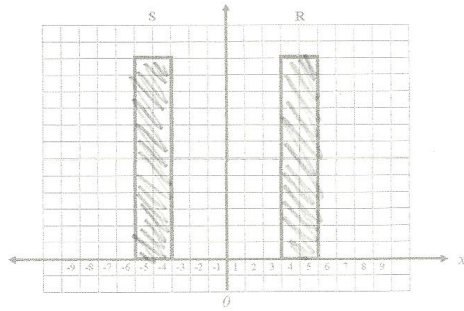
Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum projétil possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis, *pinte* na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 4 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem de projéteis. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada em unidades idênticas de projéteis,

Figura B.11: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório IV

pinte na figura abaixo qual seria o local onde possivelmente os projéteis atingirão o anteparo.



Questão 5 – Caso seja trocado projéteis por bolas de gude, o resultado do experimento mental sofreria alguma mudança?

ACHO QUE NÃO

Questão 6 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

NÃO

Figura B.12: Questões de 4 a 6 - Aluno aleatório IV

Apêndice C

Respostas do Questionário 2

Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda

Antes de prosseguirmos, revisamos a seguinte nomenclatura para ondas que aparece na Figura 21. Tal denominação será útil na aplicação deste questionário

CRISTA



VALE

λ

Figura 21 – Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ .

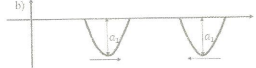
Na Figura 21, λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser entendido facilmente como a distância entre dois vales ou a distância entre duas cristas. Entretanto, a distância entre dois pontos na onda, que tenha completado um ciclo, equivale a λ .

Questão 1 – Nas figuras a seguir determine qual o tipo de interferência e o valor da amplitude resultante em função de a_1 para cada situação

a)



b)



c)



A) Construtivo = $2A$
B) Construtivo = $2A$
C) Destrutiva = 0

Texto de apoio

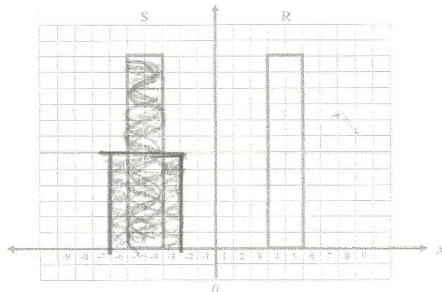
Feynman sugere que pensemos agora em uma experiência com ondas de água: “Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita da fonte temos de novo uma parede com dois orifícios e mais adiante está a segunda parede, que para manter as coisas simples, é um “absorvedor”, de forma que não há reflexão das ondas que chegam nele. Isso pode ser feito construindo um tanque onde o nível de água gradualmente diminui. Na frente do absorvedor colocamos o detector que pode ser movimentado para cima e para baixo na direção x , com antes. O detector é agora um dispositivo que mede a “intensidade” do movimento ondulatorio. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatorio, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao quadrado da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à energia sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector”.

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas, como no questionário sobre projéteis. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior intensidade da onda atingir o anteparo, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior intensidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as ondas chegarão.

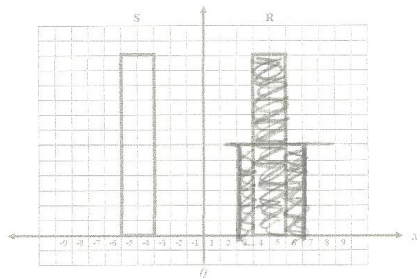
Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda, nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento

Figura C.1: Questão 1 - Aluno aleatório I

ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 4 – Como no questionário sobre partículas, o experimento proposto por Feynman pode ser representado de forma simples, como a seguir:

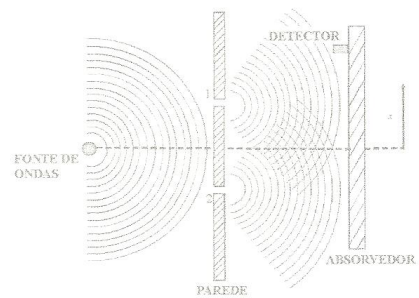


Figura 22 – Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.

Observe que tanto na fenda 1 quanto na fenda 2 as ondas sofrem o efeito de difração. Considere que as duas ondas difratadas, nas fendas 1 e 2, possuam a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda. Na Figura 22, utilizaremos a seguinte representação que será adotada para responder a *Questão 4* que aparece na Figura 23: cristas são representadas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas.

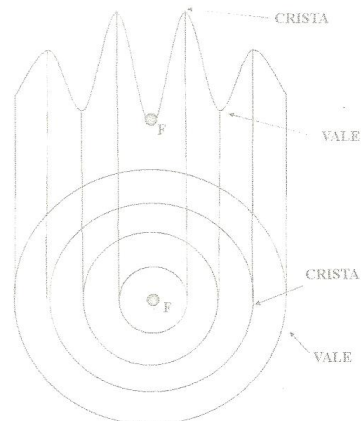


Figura 23 – Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).

Figura C.2: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório I

Na Figura 23 *pinte* as bolinhas que representem *interferência construtiva*. O encontro de duas ondas que provoquem uma *interferência destrutiva* não precisa ser pintado. Se a interferência for *construtiva* existe um dado valor de intensidade

que diminui conforme o gráfico se afasta do centro. Se a interferência for *destrutiva total*, o valor de intensidade é nulo. Definido todos os pontos do gráfico, plote o gráfico da onda que representa este fenômeno.

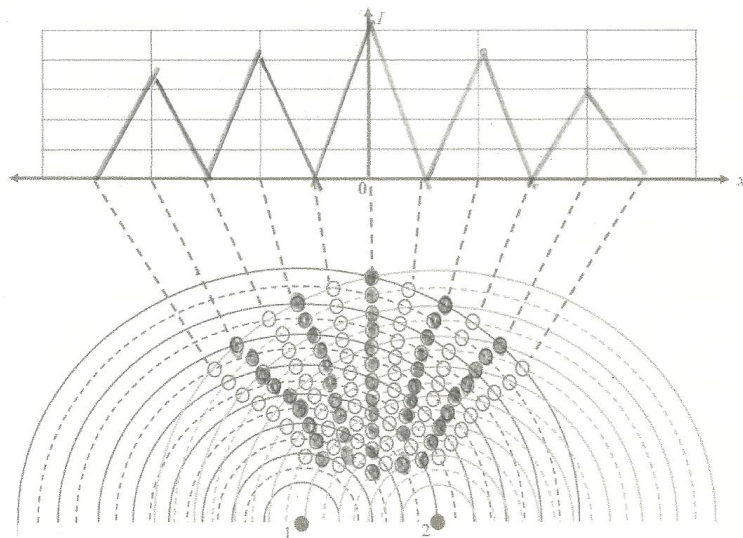


Figura 23 – Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).

Figura C.3: Questão 4 - Aluno aleatório I

Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda

Antes de prosseguirmos, revisamos a seguinte nomenclatura para ondas que aparece na Figura 21. Tal denominação será útil na aplicação deste questionário

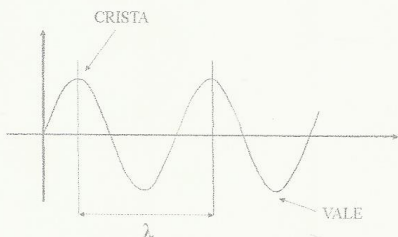
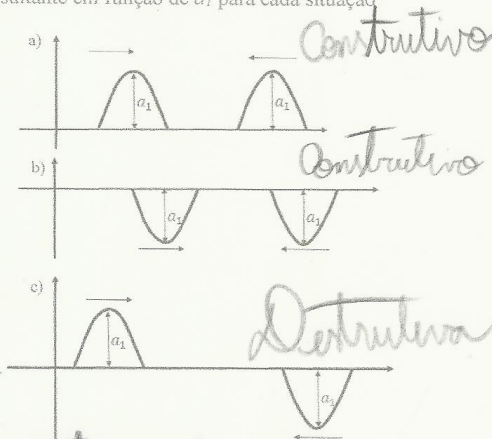


Figura 21 – Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ . Na Figura 21, λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser entendido facilmente como a distância entre dois vales ou a distância entre duas cristas. Entretanto, a distância entre dois pontos na onda, que tenha completado um ciclo, equivale a λ .

Questão 1 – Nas figuras a seguir determine qual o tipo de interferência e o valor da amplitude resultante em função de a_1 para cada situação



Alternativa A - $2a_1$
 Alternativa B - $2a_1$
 Alternativa C - zero

Texto de apoio

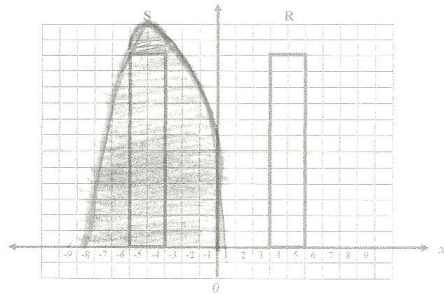
Feynman sugere que pensemos agora em uma experiência com ondas de água: “Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita da fonte temos de novo uma parede com dois orifícios e mais adiante está a segunda parede, que para manter as coisas simples, é um “absorvedor”, de forma que não há reflexão das ondas que chegam nele. Isso pode ser feito construindo um tanque onde o nível de água gradualmente diminui. Na frente do absorvedor colocamos o detector que pode ser movimentado para cima e para baixo na direção x , com antes. O detector é agora um dispositivo que mede a “intensidade” do movimento ondulatório. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatório, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao *quadrado* da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à *energia* sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector”.

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas, como no questionário sobre projéteis. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior intensidade da onda atingir o anteparo, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior intensidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as ondas chegarão.

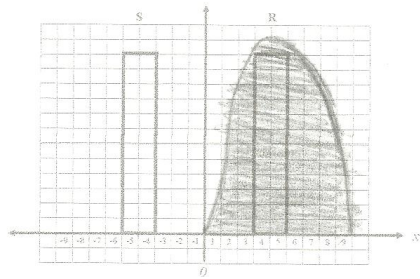
Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda, nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento

Figura C.4: Questão 1 - Aluno aleatório II

ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 4 – Como no questionário sobre partículas, o experimento proposto por Feynman pode ser representado de forma simples, como a seguir:

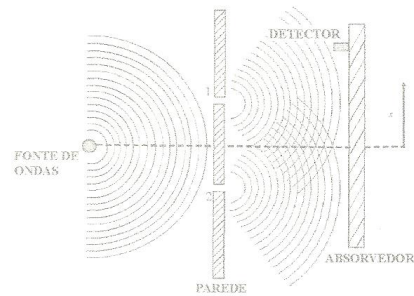


Figura 22 – Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.

Observe que tanto na fenda 1 quanto na fenda 2 as ondas sofrem o efeito de difração. Considere que as duas ondas difratadas, nas fendas 1 e 2, possuam a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda. Na Figura 22, utilizaremos a seguinte representação que será adotada para responder a *Questão 4* que aparece na Figura 23: cristas são representadas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas.

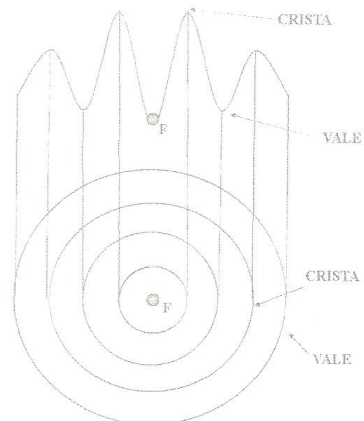


Figura 23 – Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).

Figura C.5: Questões 2 e 3 - Aluno aleatório II

Na Figura 23 *pinte* as bolinhas que representem *interferência construtiva*. O encontro de duas ondas que provoquem uma *interferência destrutiva* não precisa ser pintado. Se a interferência for *construtiva* existe um dado valor de intensidade

que diminui conforme o gráfico se afasta do centro. Se a interferência for *destrutiva total*, o valor de intensidade é nulo. Definido todos os pontos do gráfico, plote o gráfico da onda que representa este fenômeno.

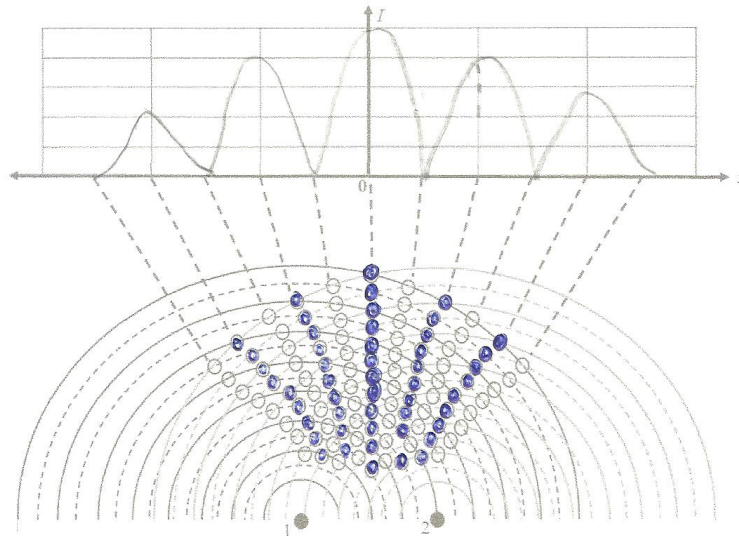


Figura 23 – Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).

Figura C.6: Questão 4- Aluno aleatório II

Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda

Antes de prosseguirmos, revisamos a seguinte nomenclatura para ondas que aparece na Figura 21. Tal denominação será útil na aplicação deste questionário

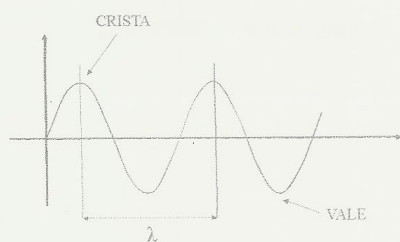
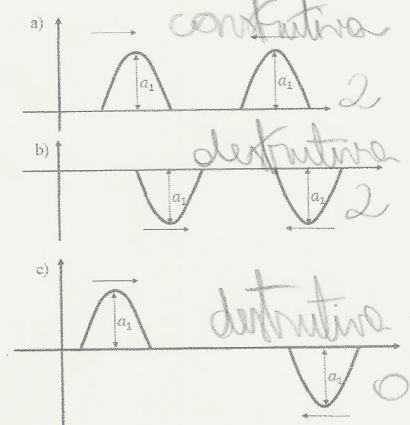


Figura 21 – Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ . Na Figura 21, λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser entendido facilmente como a distância entre dois vales ou a distância entre duas cristas. Entretanto, a distância entre dois pontos na onda, que tenha completado um ciclo, equivale a λ .

Questão 1 – Nas figuras a seguir determine qual o tipo de interferência é o valor da amplitude resultante em função de a_1 para cada situação



Texto de apoio

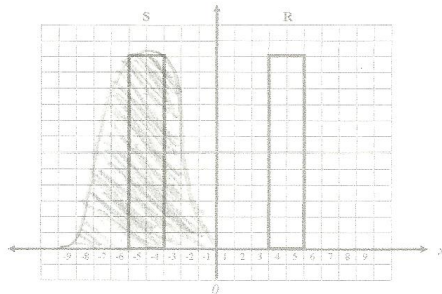
Feynman sugere que pensemos agora em uma experiência com ondas de água: “Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita da fonte temos de novo uma parede com dois orifícios e mais adiante está a segunda parede, que para manter as coisas simples, é um “absorvedor”, de forma que não há reflexão das ondas que chegam nele. Isso pode ser feito construindo um tanque onde o nível de água gradualmente diminui. Na frente do absorvedor colocamos o detector que pode ser movimentado para cima e para baixo na direção x , com antes. O detector é agora um dispositivo que mede a “intensidade” do movimento ondulatório. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatório, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao *quadrado* da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à *energia* sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector”.

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas, como no questionário sobre projéteis. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior intensidade da onda atingir o anteparo, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior intensidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as ondas chegarão.

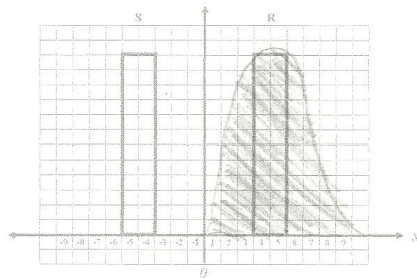
Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda, nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento

Figura C.7: Questão 1 - Aluno aleatório III

ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado. *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 4 – Como no questionário sobre partículas, o experimento proposto por Feynman pode ser representado de forma simples, como a seguir:

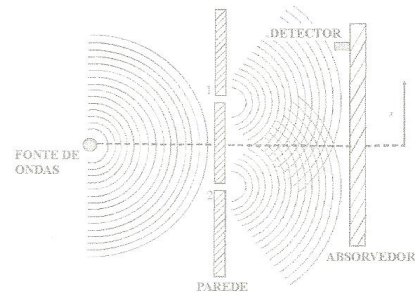


Figura 22 – Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.

Observe que tanto na fenda 1 quanto na fenda 2 as ondas sofrem o efeito de difração. Considere que as duas ondas difratadas, nas fendas 1 e 2, possuam a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda. Na Figura 22, utilizaremos a seguinte representação que será adotada para responder a *Questão 4* que aparece na Figura 23: cristas são representadas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas.

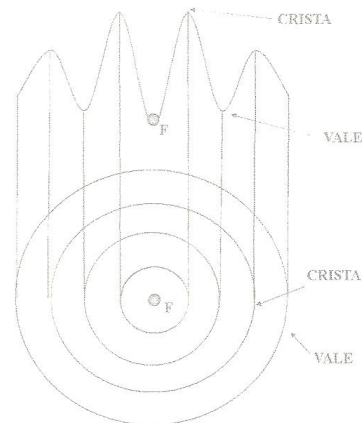


Figura 23 – Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).

Na Figura 23 *pinte* as bolinhas que representem *interferência construtiva*. O encontro de duas ondas que provoquem uma *interferência destrutiva* não precisa ser pintado. Se a interferência for *construtiva* existe um dado valor de intensidade

que diminui conforme o gráfico se afasta do centro. Se a interferência for *destrutiva total*, o valor de intensidade é nulo. Definido todos os pontos do gráfico, plote o gráfico da onda que representa este fenômeno.

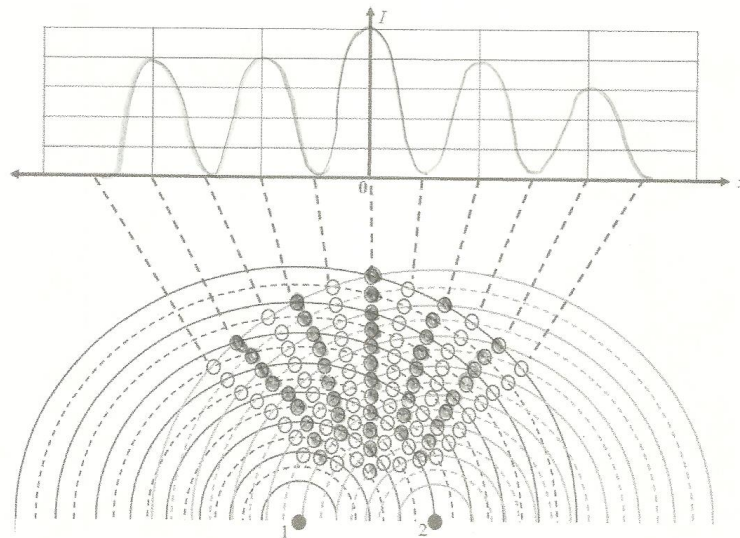


Figura 23 – Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).

Questionário 2 – Ondas no Experimento da Dupla Fenda

Antes de prosseguirmos, revisamos a seguinte nomenclatura para ondas que aparece na Figura 21. Tal denominação será útil na aplicação deste questionário

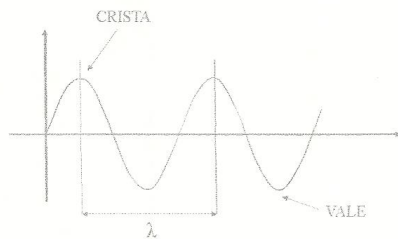
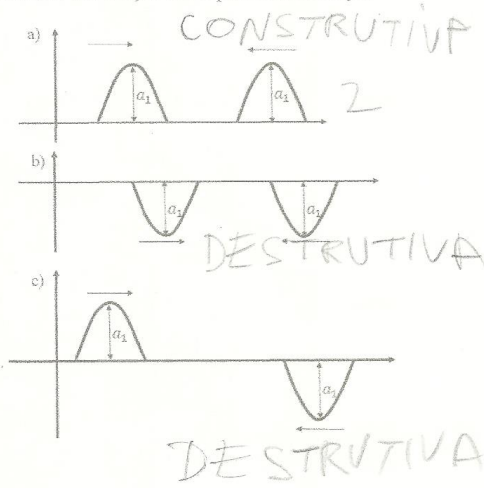


Figura 21 – Representação de uma onda qualquer destacando a crista, o vale e o comprimento de onda λ . Na Figura 21, λ é o comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser entendido facilmente como a distância entre dois vales ou a distância entre duas cristas. Entretanto, a distância entre dois pontos na onda, que tenha completado um ciclo, equivale a λ .

Questão 1 – Nas figuras a seguir determine qual o tipo de interferência é o valor da amplitude resultante em função de a_1 para cada situação



Texto de apoio

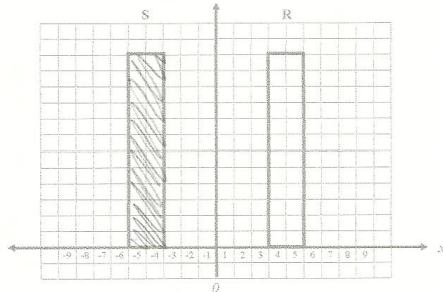
Feynman sugere que pensemos agora em uma experiência com ondas de água: “Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita da fonte temos de novo uma parede com dois orifícios e mais adiante está a segunda parede, que para manter as coisas simples, é um “absorvedor”, de forma que não há reflexão das ondas que chegam nele. Isso pode ser feito construindo um tanque onde o nível de água gradualmente diminui. Na frente do absorvedor colocamos o detector que pode ser movimentado para cima e para baixo na direção x , com antes. O detector é agora um dispositivo que mede a “intensidade” do movimento ondulatório. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatório, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao *quadrado* da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à *energia* sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector”.

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas, como no questionário sobre projéteis. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior intensidade da onda atingir o anteparo, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior intensidade de que ocorra incidência de projéteis, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que as ondas chegarão.

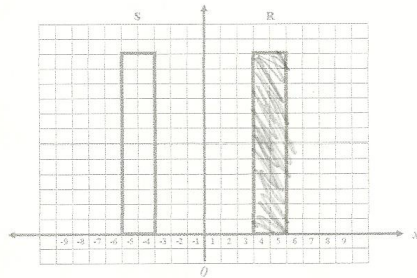
Questão 2 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda, nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento

Figura C.10: Questão 1 - Aluno aleatório IV

ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 3 – Da mesma forma que na *Questão 2*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhuma onda possa passar. Sabendo que o experimento mede a intensidade do movimento ondulatório através da medida da altura, calibrada ao quadrado, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente as ondas atingirão o anteparo.



Questão 4 – Como no questionário sobre partículas, o experimento proposto por Feynman pode ser representado de forma simples, como a seguir:

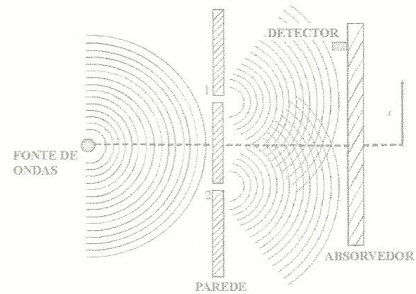


Figura 22 – Representação do experimento de Feynman e colaboradores usando ondas de água.

Observe que tanto na fenda 1 quanto na fenda 2 as ondas sofrem o efeito de difração. Considere que as duas ondas difratadas, nas fendas 1 e 2, possuam a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda. Na Figura 22, utilizaremos a seguinte representação que será adotada para responder a *Questão 4* que aparece na Figura 23: cristas são representadas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas.

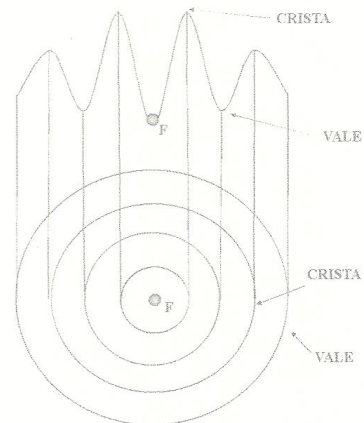


Figura 23 – Interferência bidimensional. Vista lateral na parte superior da figura e vista de cima na parte inferior. F é uma fonte de ondas igual a de Feynman (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas).

Na Figura 23 *pinte* as bolinhas que representem *interferência construtiva*. O encontro de duas ondas que provoquem uma *interferência destrutiva* não precisa ser pintado. Se a interferência for *construtiva* existe um dado valor de intensidade

que diminui conforme o gráfico se afasta do centro. Se a interferência for *destrutiva total*, o valor de intensidade é nulo. Definido todos os pontos do gráfico, plote o gráfico da onda que representa este fenômeno.

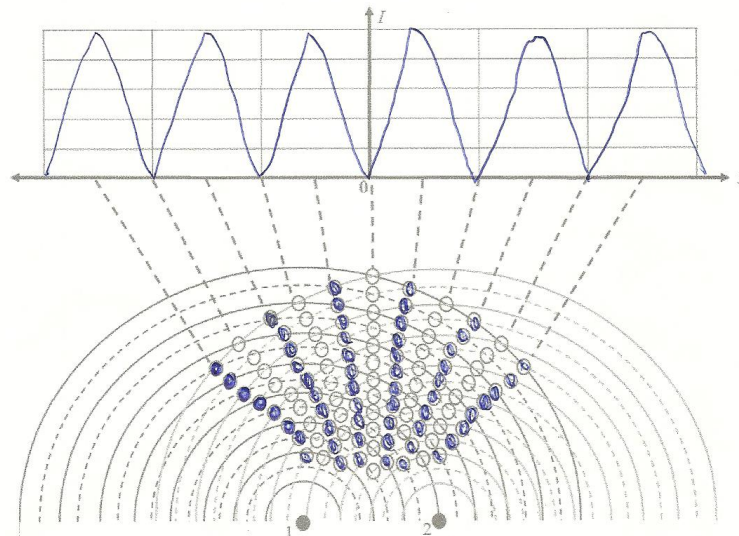


Figura 23 – Representação das duas ondas difratadas nas fendas 1 e 2. I é a intensidade da onda. O valor mínimo de intensidade está na ordenada x (representamos cristas por linhas contínuas e vales por linhas tracejadas mudamos a cor da onda para distinguir a onda difratada na fenda 1 da onda difratada na fenda 2).

Figura C.12: Questão 4 - Aluno aleatório IV

Apêndice D

Respostas do Questionário 3

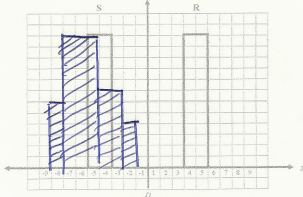
Questionário 3 – Elétrons no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

Feynman propõem finalmente o experimento da dupla fenda com elétrons: "Um canhão de elétrons, que consiste em um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado em uma caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação a caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão (essencialmente) a mesma energia. Na frente do canhão mais uma vez temos uma parede (fina de metal) com dois orifícios. Além da parede, está outra placa que servirá como anteparo. Na frente do anteparo colocamos um detector móvel. O detector pode ser um contador Geiger ou, talvez, até melhor, uma multiplicadora de elétrons, que será conectada a um alto-falante ... A primeira coisa que notamos com a experiência é que ouvimos um clique sempre que um elétron atinge o detector (o alto-falante). E todos os cliques são iguais. Não existe "meio clique"."

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o elétron chegue e escutemos um clique, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição -8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de elétrons, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que os elétrons chegarão.

Questão 1 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 2 – Da mesma forma que na Questão 1, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

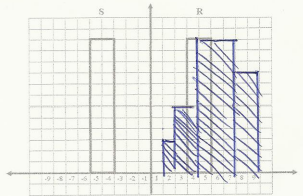
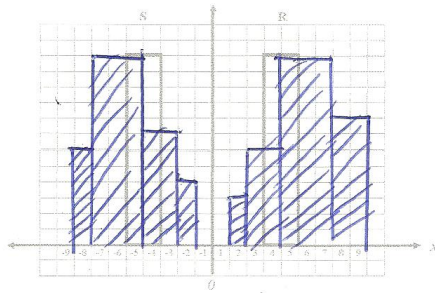


Figura D.1: Questões 1 e 2 - Aluno aleatório I

Questão 3 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem dos elétrons. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 4 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

Se existe essa pergunta aqui é porque a resposta deve ser sim. Não consigo imaginar outra resposta.

Figura D.2: Questões 3 e 4 - Aluno aleatório I

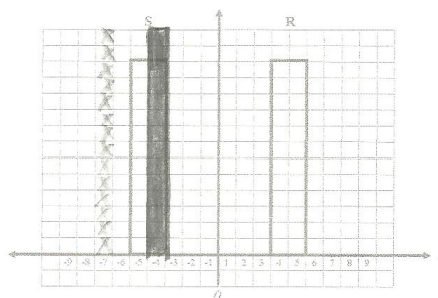
Questionário 3 – Elétrons no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

Feynman propõem finalmente o experimento da dupla fenda com elétrons: “Um canhão de elétrons, que consiste em um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado em uma caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação a caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão (essencialmente) a mesma energia. Na frente do canhão mais uma vez temos uma parede (fina de metal) com dois orifícios. Além da parede, está outra placa que servirá como anteparo. Na frente do anteparo colocamos um detector móvel. O detector pode ser um contador Geiger ou, talvez, até melhor, uma multiplicadora de elétrons, que será conectada a um alto-falante ... A primeira coisa que notamos com a experiência é que ouvimos um clique sempre que um elétron atinge o detector (o alto-falante). E todos os cliques são iguais. Não existe “meio clique”.”

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o elétron chegue e escutemos um clique, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de elétrons, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que os elétrons chegarão.

Questão 1 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 2 – Da mesma forma que na Questão 1, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

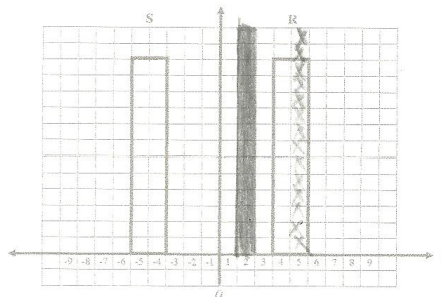
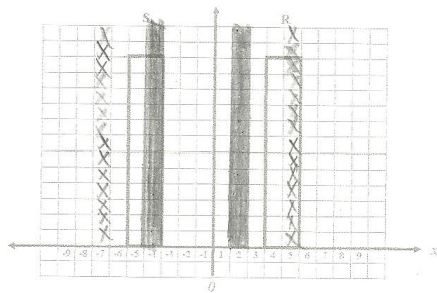


Figura D.3: Questões 1 e 2 - Aluno aleatório II

Questão 3 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem dos elétrons. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 4 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

NÃO.

Figura D.4: Questões 3 e 4 - Aluno aleatório II

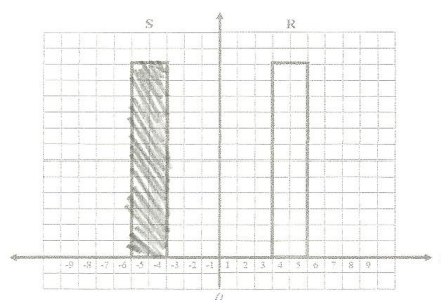
Questionário 3 – Elétrons no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

Feynman propõem finalmente o experimento da dupla fenda com elétrons: “Um canhão de elétrons, que consiste em um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado em uma caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação a caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão (essencialmente) a mesma energia. Na frente do canhão mais uma vez temos uma parede (fina de metal) com dois orifícios. Além da parede, está outra placa que servirá como anteparo. Na frente do anteparo colocamos um detector móvel. O detector pode ser um contador Geiger ou, talvez, até melhor, uma multiplicadora de elétrons, que será conectada a um alto-falante ... A primeira coisa que notamos com a experiência é que ouvimos um clique sempre que um elétron atinge o detector (o alto-falante). E todos os cliques são iguais. Não existe “meio clique”.”

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o elétron chegue e escutemos um clique, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de elétrons, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que os elétrons chegarão.

Questão 1 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 2 – Da mesma forma que na *Questão 1*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

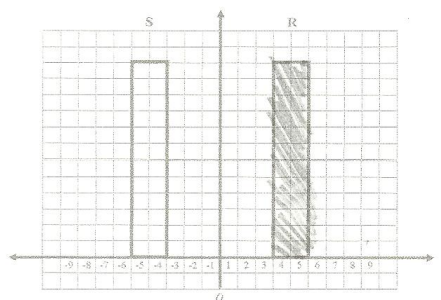
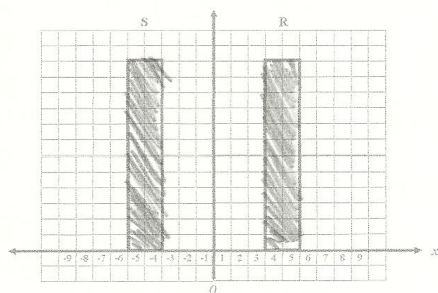


Figura D.5: Questões 1 e 2 - Aluno aleatório III

Questão 3 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem dos elétrons. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 4 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

Não

Figura D.6: Questões 3 e 4 - Aluno aleatório III

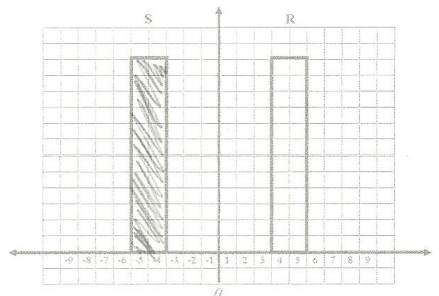
Questionário 3 – Elétron no Experimento da Dupla Fenda

Texto de apoio

Feynman propõem finalmente o experimento da dupla fenda com elétrons: “Um canhão de elétrons, que consiste em um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado em uma caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação a caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão (essencialmente) a mesma energia. Na frente do canhão mais uma vez temos uma parede (fina de metal) com dois orifícios. Além da parede, está outra placa que servirá como anteparo. Na frente do anteparo colocamos um detector móvel. O detector pode ser um contador Geiger ou, talvez, até melhor, uma multiplicadora de elétrons, que será conectada a um alto-falante ... A primeira coisa que notamos com a experiência é que ouvimos um clique sempre que um elétron atinge o detector (o alto-falante). E todos os cliques são iguais. Não existe “meio clique”.”

Nas questões a seguir reproduzimos o anteparo frontalmente no quadro de respostas. Para responder as questões utilize a seguinte regra: o local que há maior possibilidade (probabilidade) de que o elétron chegue e escutemos um clique, deve ter maior número de quadrados pintados de baixo para cima. Por exemplo, se na posição - 8 no meio da figura você acredita que haverá a maior probabilidade de que ocorra incidência de elétrons, pinte os quadrados de cima para baixo na figura e não na região onde você acredita que os elétrons chegarão.

Questão 1 – Antes do início do experimento cobrimos a fenda 2 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 2 – Da mesma forma que na *Questão 1*, antes do início do experimento cobrimos a fenda 1 de forma que por esta fenda nenhum elétron possa passar. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.

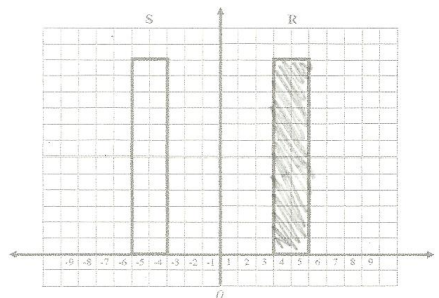
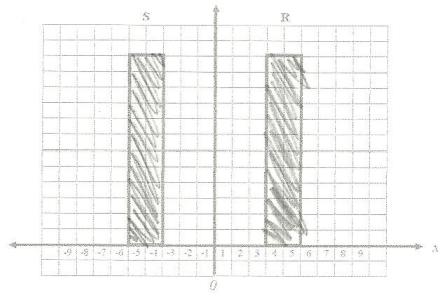


Figura D.7: Questões 1 e 2 - Aluno aleatório IV

Questão 3 – Agora as duas fendas estão livres sem nada que interrompa a passagem dos elétrons. Sabendo que o experimento mede a probabilidade de chegada dos elétrons provocando um clique, *pinte* na figura abaixo, qual seria o local onde possivelmente os elétrons atingirão o anteparo.



Questão 4 – É possível encontrar um outro resultado para este experimento? Se a sua resposta for afirmativa, reproduza uma figura com este resultado.

NÃO. O ELETRON É IGUAL DA BOLA.

Figura D.8: Questões 3 e 4 - Aluno aleatório IV