

DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS: CONCEPÇÕES DE LICENCIANDOS EM FÍSICA E POSSÍVEIS MUDANÇAS ATRAVÉS DO CICLO DA EXPERIÊNCIA KELLYANA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino das Ciências - Nível de Mestrado, da UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ensino das Ciências.

Orientadora: Heloisa Flora Brasil Nóbrega Bastos, PhD.

Co-orientador: Prof. Dr. Ernande Barbosa da Costa.

Recife, fevereiro de 2006.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Ficha catalográfica
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

S237d Santos, Marcos Antônio Barros
Difração de elétrons: concepções de licenciandos em física e possíveis mudanças através do ciclo da experiência kellyana 1 Marcos Antônio Barros Santos - 2005.
142 f : il.

Orientador: Heloísa Flora Brasil Nóbrega Bastos.
Dissertação (Mestrado em Ensino das Ciências) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Educação.
Inclui bibliografia, anexo e apêndice.

CDD 530.07

1. Física - Estudo e ensino
2. Ciclo da Experiência Kellyana
3. Difração
4. Elétrons
5. Alunos
6. Concepção
1. Bastos, Heloisa Flora Brasil Nóbrega
11. Título

Marieide Guedes
Bibliotecária
CR13 1135

DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS: CONCEPÇÕES DE LICENCIANDOS EM FÍSICA E POSSÍVEIS MUDANÇAS ATRAVÉS DO CICLO DA EXPERIÊNCIA KELLYANA.

Marcos Antonio Barros Santos

Banca Examinadora:

Presidente: _____
Prof^ª. Heloisa Flora B. N. Bastos, W. (UFRPE)

1* Examinador: _____
Prof^º. Antonio Carlos da Silva Miranda, Dr. (UNICAP)

2' Examinador: _____
Prof^º. Alexandro Cardoso Tenório, Dr. (UFRPE)

3* Examinadora: _____
of^º. Ernande Barbosa da Costa, Dr. (UFRPE)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os amigos e familiares, em especial a minha esposa Ana Paula que sempre acreditou na minha competência, aos meus filhos, Rayssa e Matheus por terem entendido a minha ausência, dando-me força nos vários momentos dessa pós-graduação. Deus vos abençoe e guarde!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que está sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida, dando-me sabedoria e humildade suficientes para efetuar passos seguros.

À Professora Heloisa Bastos pela firmeza, compreensão e orientação sempre presentes e necessárias, durante a construção desse trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Ensino das Ciências, da UFRPE, pelo convívio profícuo.

Aos colegas do mestrado, que contribuíram com sugestões de forma e de conteúdo para o presente trabalho (Clóvis, Ari, úrsula, Rodrigo, Washington, Wilder ...), durante os almoços.

À Professora Marly Oliveira pelos ensinamentos e correções necessárias.

Aos funcionários da UFRPE pela colaboração e disponibilidade.

Aos amigos da "casa dos estudantes", na pessoa de Leandro Silva, por ter aceitado mais um intruso na mansão.

A minha família, que soube entender a minha ausência nas horas mais fraternas e ao meu irmão Beto, que não esperou pelo término deste trabalho.

Que Deus continue iluminando a todos!!!!

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de verificar as mudanças que ocorrem nas concepções de licenciandos em física, sobre difração de elétrons, quando utilizam o Ciclo da Experiência Kellyana. As cinco etapas desse Ciclo (antecipação, investimento, encontro, confirmação/refutação e revisão construtiva) foram distribuídas em dez reuniões, com duração média de duas horas cada, durante as quais foram acompanhadas as concepções dos alunos, desde as iniciais, detectadas através de um pré-teste, até as concepções mantidas ao término da intervenção didática, através de um pós-teste e de uma entrevista. Foram investigados, inicialmente, cinco alunos de Física Moderna e dez de Mecânica Quântica, do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em Campina Grande, obtendo-se concepções sobre difração de elétrons semelhantes às descritas em pesquisas anteriores. As etapas posteriores do Ciclo da Experiência Kellyana foram aplicadas apenas a sete alunos de Mecânica Quântica, cujas concepções sofreram mudanças na direção de uma maior articulação entre as visões corpuscular e ondulatória da matéria, o que possibilitou uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto.

ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the changes that occur with the conceptions of physics licentiate students, in relation to electron difraction, when using Kelly's Cycle of Experience. The five steps of this cycle (anticipation, investment, meeting, conffinnation/refutation and constructive review) were distributed during 10 meetings, with an average duration of two hours. During these meetings the students' conceptions were followed, starting with a pre-test and ending with the evaluation of the acquired conceptions, using a post-test and an interview. At first 15 students from Universidade Estadual da Paraiba (Campina Grande, Brazil) were investigated, 5 of them. in Modem Physics and 10 in. Quantum Mechanics. Their conceptions in electron difraction were similar to those shown in previous surveys. The following steps of Kelly's Cycle of Experience were applied only to 7 students of Quantum Mechanics whose conceptions changed to a better understanding of the relationship between the mass and wave visions of matter. As a result, a deeper and less fragmented understanding of this subject was possible.

SUMÁRIO	viii
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTO	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS E TABELAS	xi
INTRODUÇÃO	01
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	06
2.1 Luz: onda ou partícula?	06
2.2 Princípio de Huygens	07
2.3 Interferência de ondas	09
2.4 Experiência de Young	11
2.5 Difi-ação de ondas luminosas	13
2.6 Ondas eletromagnéticas estacionárias	15
2.7 Efeito fotoelétrico	16
2.7.1 Explicação de Einstein para o efeito fotolétrico	17
2.8 Difração de raios-x	18
2.9 Efeito Compton	20
2.10 Ondas de de Broglie	21
2.11 Difração de elétrons	23
2.11.1 Experimento da dupla fenda. A interpretação de Copenhagen	26
2.12 Teoria dos Construtos Pessoais	29
2.13 Ciclo da Experiência Kellyana	32
3. METODOLOGIA	35
3.1 Procedimentos metodológicos da pesquisa	36

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	41
4.1 Análise dos dados do pré-teste	41
4.2 Considerações finais do pré-teste.....	68
4.3 Análise dos dados do Ciclo da Experiência Kellyana.....	71
4.3.1 Questionário do investimento.....	71
4.3.2 Questionário confirmação/refutação (1ª aula)	77
4.3.3 Questionário confirmação/refutação (2ª aula)	82
4.4 Análise dos dados do pós-teste	87
4.5 Considerações finais do pós-teste.....	101
4.6 Entrevista	102
5. CONCLUSÕES.....	104
6. REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICES	109
APÊNDICE A - PRÉ-TESTE	110
APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO DO INVESTIMENTO	113
APÊNDICE C - PLANO DE AULA (1º ENCONTRO)	114
APÊNDICE D - QUESTIONÁRIO (1ª AULA)	115
APÊNDICE E - PLANO DE AULA (2º ENCONTRO)	116
APÊNDICE F - QUESTIONÁRIO (2º ENCONTRO)	117
APÊNDICE G – ARTIGO	118
APÊNDICE H - NORMAS PARA PUBLICAÇÃO NO CBEF	135
ANEXOS.....	136
ANEXO 1 - PROGRAMA DE FÍSICA MODERNA DA UEPB	137
ANEXO 2 - PROGRAMA DE MECÂNICA QUÂNTICA DA UEPB ..	142

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Construção das frentes de ondas, segundo Huygens	8
FIGURA 02 - Padrão de interferência de duas fontes puntiformes	9
FIGURA 03 - Modelos de interferência	10
FIGURA 05 - Modelo de difração e interferência luminosa	11
FIGURA 06 - Franjas de Young	11
FIGURA 07 - Difração de ondas planas	13
FIGURA 08 - Modelo de difração para a luz	14
FIGURA 09 - Ondas eletromagnéticas	16
FIGURA 10 - Difração de feixe de raios-x	19
FIGURA 11 - Espalhamento entre um fóton e um elétron.	20
FIGURA 12 - Padrão real de interferência.....	24
FIGURA 13 - Modelo de observação com alteração e interferência e elétrons	25
FIGURA 14 - Ciclo da Experiência Kellyana	32

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 01 - Respostas dadas à questão 1a do pré-teste	41
TABELA 02 - Respostas dadas à questão 1.b do pré-teste	43
TABELA 03 - Respostas dadas à questão 1.c do pré-teste	45
TABELA 04 - Respostas dadas à questão 2a do pré-teste	49
TABELA 05 - Respostas dadas à questão 2.b do pré-teste	52
TABELA 06 - Respostas dadas à questão 2.c do pré-teste	55
TABELA 07 - Respostas dadas à questão 03 do pré-teste	57
TABELA 08 - Respostas dadas à questão 04 do pré-teste	59
TABELA 09 - Respostas dadas à questão 5.a do pré-teste	62
TABELA 10 - Respostas dadas à questão 5.b do pré-teste	65
TABELA 11 - Respostas dadas à questão 01 do questionário do investimento	70
TABELA 12 - Respostas dadas à questão 02 do questionário do investimento	71
TABELA 13 - Respostas dadas à questão 03 do questionário do investimento	72
TABELA 14 - Respostas dadas à questão 04 do questionário do investimento	73
TABELA 15 - Respostas dadas à questão 05 do questionário do investimento	74
QUADRO 01 - Respostas dadas à questão 1a do pós-teste	86
QUADRO 02 - Respostas dadas à questão 1.b do pós-teste	87
QUADRO 03 - Respostas dadas à questão 1.c do pós-teste	88
QUADRO 04 - Respostas dadas à questão 2.a do pós-teste	89
QUADRO 05 - Respostas dadas à questão 2.b do pós-teste	90
QUADRO 06 - Respostas dadas à questão 2.c do pós-teste	91
QUADRO 07 - Respostas dadas à questão 03 do pós-teste	94
QUADRO 08 - Respostas dadas à questão 04 do pós-teste	96
QUADRO 09 - Respostas dadas à questão 5.a do pós-teste	98
QUADRO 10 - Respostas dadas à questão 5.b do pós-teste	99

INTRODUÇÃO

Muitos pesquisadores, seguindo uma linha de investigação didática em nível universitário, têm constatado a existência de graves erros conceituais em variados assuntos nas disciplinas de Mecânica Quântica e/ou Estrutura da Matéria (SOLBES *et al.* 1987). Segundo esses pesquisadores, tais erros são decorrentes de *conflitos* entre professores e alunos, que podem estar associados à falta de comunicação entre eles, devida à falta de conhecimento, por parte dos professores, das concepções prévias de seus alunos ou à necessidade de romper com o paradigma Newtoniano¹, para aceitar uma física de novas concepções também abstratas. Essas novas concepções, segundo os pesquisadores, são geradas a partir do momento em que os alunos ignoram a existência de crises no desenvolvimento da física clássica, durante o final do século XIX.

Essas dificuldades de interpretação dos novos paradigmas da Mecânica Quântica (MQ), bem como a forte resistência à mudança, acompanhada de sérios erros conceituais são encontradas com frequência em licenciados ou bacharéis em Física onde se constata segundo Montenegro (2000), que alguns conceitos básicos da física quântica, como os envolvidos no experimento da dupla fenda para um único elétron, não são suficientemente salientados pelos professores, que dão pouca ênfase aos aspectos fenomenológicos, utilizando-se das equações para as suas argumentações.

A pesquisa de Agra (1994) revela que essas dificuldades estão associadas ao modelo de ensino tradicional, ao mostrar que os professores se preocupam, durante a aprendizagem dessa teoria por parte de seus alunos, apenas com o formalismo matemático da Mecânica Quântica em resolução de problemas-padrão, sem vínculos com a realidade, deixando de fora a interpretação física do fenômeno analisado. Os professores pesquisados acham que é importante o uso da matemática na MQ, tanto que para um dos professores entrevistados na pesquisa citada, é mais fácil apresentar a MQ para um matemático do que para um aluno de física, além disso, ele considera que "o ensino de questões conceituais da MQ pode levar o aluno ao desinteresse pela carreira de físico" (AGRA, 1994, p. 45).

¹ O ano de 1905, segundo Bachelard (BACHELARD, 1996), é considerado o início da era do novo espírito científico, pois com o advento da teoria da Relatividade, deformam-se conceitos primordiais que eram tidos como fixados para sempre.

Em outro trabalho, Fletcher *et al* (1998) relatam que os conceitos fundamentais da Mecânica Quântica não são compreendidos pelos estudantes. Estes apresentam sérias dificuldades para associá-los às experiências cotidianas e, por isso, o processo de mudança conceitual é lento. Segundo esses autores, essa persistência de erros conceituais na disciplina de Mecânica Quântica (MQ) é devida ao modelo didático utilizado habitualmente pelo professor, que não leva em consideração as concepções prévias dos alunos, como Solbes *et al* concluíram.

Numa entrevista realizada com dezesseis estudantes de Física Moderna (FM) e quatorze de MQ, na Universidade de Washington (EUA), conduzida por Ambrose *et al* (1999), sobre o comportamento da luz quando incidia sobre um anteparo com uma ou duas fendas (difração e interferência), foram constatadas várias concepções sobre fótons, das quais destacamos o desconhecimento do fenômeno da difração. Posteriormente, esses pesquisadores elaboraram um questionário com questões envolvendo elétrons, cujos resultados mostraram que os erros conceituais cometidos não foram restritos aos fótons.

É possível verificar uma semelhança nos conflitos apresentados na pesquisa anterior com a pesquisa realizada por Montenegro e Pessoa (2002), realizada com oito turmas de MQ do Instituto de Física da USP. Os alunos apresentam as mesmas dificuldades na abordagem corpuscular, quando se tenta explicar difração e padrões de interferência para elétrons. Nas entrevistas, estudantes "visualizam" os elétrons como "bolinhas se movimentando, não localizada, com difícil visualização de sua natureza ondulatória" (p.106). Percebe-se nessa concepção espontânea a forte presença da física clássica, devido ao fato da imagem corpuscular clássica ser muito forte no aluno que estuda Mecânica Quântica, ou seja, o aluno não consegue romper facilmente com a Física Clássica, segundo Solbes *et al*.

Com relação ao fenômeno da difração de elétrons, Masshadi (1996), em sua pesquisa com cinquenta e sete alunos do último nível secundário na Inglaterra, encontrou a mesma realidade dessas pesquisas citadas acima, ou seja, 30% dos alunos conceituam o elétron como partícula e outros 60% como onda, durante o fenômeno da difração.

Ainda em nossa revisão de literatura, encontramos um trabalho que discute especificamente as concepções em Mecânica Quântica de estudantes de Licenciatura

em Física (EULER et al. 1999), da Universidade de Kiel, na Alemanha, obtidas através de uma entrevista com treze estudantes que já tinham completado o curso sobre Mecânica Quântica e estavam aptos para lecionar no ensino médio. Os pesquisadores, na entrevistas, utilizaram perguntas já usadas em outras pesquisas, para a detecção de concepções em assuntos variados da Mecânica Quântica. Os resultados mostram que dez dos estudantes responderam de forma clássica, dois de forma híbrida e somente um respondeu de forma quântica convincente.

Uma pesquisa empírica com entrevista semi-estruturada² (MOTA, 2000), realizada com licenciados das Universidades Federais de Santa Catarina (8 professores) e da Bahia (8 professores), cuja graduação tinha sido concluída há nove anos atrás, mostra vários problemas no ensino da Mecânica Quântica durante sua formação:

- Os entrevistados criticam o pouco contato com a teoria;
- A abordagem matemática intensa;
- Ausência da história sobre a Mecânica Quântica.

Essas deficiências são manifestadas quando os mesmos são postos à prova para ensinar física moderna contemporânea (FMC) no ensino médio; levando-os a não se sentirem preparados para ensinar essa disciplina e creditarem essa falta de preparo à pouca ou nenhuma ênfase dada pelas licenciaturas a essa área do ensino da física, que é mais instrumentalista, tendo como objetivo principal a apreensão do aparato matemático das teorias e o posterior treino na resolução de problemas.

Diante desses resultados, resolvemos inicialmente pesquisar as concepções desenvolvidas pelos alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) em Campina Grande, em relação ao comportamento apresentado por elétrons numa difração em fenda dupla, após cursarem as disciplinas da Física Moderna e Mecânica Quântica e compará-las com os resultados apresentados nessas pesquisas citadas anteriormente.

² Oferece aos participantes da amostra, um grau de liberdade que visa obter aspectos mais relevantes do problema (RICHARDSON, 1999).

Em seguida, pesquisaremos possíveis mudanças conceituais em um tema considerado complexo da MQ, a difração de elétrons, obtidas com o uso de uma intervenção didática baseada no *Corolário da Experiência* da Teoria dos Construtos Pessoais de G. Kelly (1970). A importância do tema escolhido, como um exemplo paradigmático, reside no fato do mesmo se mostrar contraditório e contra-intuitivo, gerando concepções ou conflitos cognitivos, ou seja, segundo as pesquisas citadas, a maioria dos alunos possui uma "imagem" de onda para a luz e imagem de partícula quando se falam de elétrons, frutos de uma linguagem puramente matemática.

Para uma mudança conceitual mais aprimorada, muito desses modelos exigem que procedimentos didáticos mais alternativos sejam usados, além da matemática já utilizada, como experimentos reais, virtuais e mentais, relatos históricos e conceituais, a respeito do assunto abordado, por professores, durante o processo de ensino-aprendizagem, tendo em vista que, a TCP de Kelly, concebe essa aprendizagem, partindo do pressuposto que todo homem é também um cientista, que testa hipóteses e revisa modelos.

O papel da Teoria dos Construtos Pessoais, como teoria psicológica, é afirmar que a maneira como uma pessoa vê o mundo não é estática, mas se encontra em constantes modificações, conforme ela interpreta sucessivamente as situações em que se encontra, conforme palavras do próprio Kelly (1970, p. 73, tradução livre):

Não é o que acontece ao redor dele que toma um homem experiente; é a sucessiva interpretação e reinterpretarão daquilo que acontece, à medida que acontece, que enriquece a experiência de sua vida.

Assim, este trabalho teve como objetivo geral:

- Verificar as mudanças que ocorrem nas concepções de licenciandos em física, sobre difração de elétrons, quando utilizam o Ciclo da Experiência Kellyana.

Além desse, teve como objetivos específicos:

- Diagnosticar as concepções de alunos do curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que estão cursando as disciplinas de Física Moderna e Mecânica Quântica, em relação à difração de elétrons.
- Comparar as concepções apresentadas pelos alunos com as concepções obtidas na revisão de literatura.
- Analisar as mudanças provocadas nas concepções devidas a uma seqüência didática baseada no Ciclo da Experiência Kellyana.

Durante esta pesquisa, apoiamo-nos nas seguintes hipóteses:

- Alunos de Mecânica Quântica (MQ) continuam apresentando as mesmas concepções sobre difração de elétrons que alunos de Física Moderna (17M), apesar de seus estudos mais aprofundados sobre o assunto.
- A vivência do Ciclo da Experiência Kellyana pode provocar alterações nas concepções dos alunos sobre difração de elétrons.

Este trabalho é apresentado em quatro capítulos. No primeiro, temos a fundamentação teórica, que apresenta um acompanhamento da evolução histórica do conceito de luz, desde Huygens até as interpretações utilizadas pela MQ para a compreensão dos seus fenômenos. Ainda nesse capítulo, temos um item a respeito das bases teóricas da Teoria dos Construtos Pessoais (KELLY, 1970), bem como um estudo mais detalhado do corolário da experiência, que será utilizado nesta pesquisa. No segundo, temos a descrição dos detalhes da metodologia usada nesta pesquisa, incluindo as intervenções didáticas e os instrumentos de coleta de dados utilizados nas diversas etapas do Ciclo da Experiência, assim como os procedimentos utilizados para a análise de dados, desde o pré-teste até a entrevista, com suas respectivas considerações finais. Finalmente, no quarto capítulo, temos as conclusões e uma sugestão para futuras pesquisas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Desde a Antigüidade, os filósofos gregos acreditavam que a luz era constituída de pequenas partículas, propagando-se em linha reta com altíssima velocidade. Para Aristóteles (384 - 322 a.C.) a luz resultava de uma atividade em determinado meio translúcido, comparando-se à natureza vibratória do som, considerado como uma onda (ROSMORDUC, 1983). O caráter filosófico do conflito sobre a natureza da luz, entre as idéias Pitagóricas e as Platônicas, predominou até o século XVII, quando passou para o plano dos desenvolvimentos dos modelos matemáticos e empíricos, com duas correntes de pensamentos: a primeira, liderada por Isaac Newton, com grande prestígio, favorável a idéias do modelo corpuscular da luz e a segunda, defendida inicialmente por Descartes e posteriormente pelo físico holandês Christiaan Huygens, favorável ao modelo ondulatório para a luz (BASSALO, 1987).

2.1 Luz: onda ou partícula?

Essa disputa perdurou por todo o final do século XVII e XVIII, sendo que a grande maioria dos físicos optava por adotar a perspectiva do modelo corpuscular da luz, proposta por Isaac Newton. Entretanto, outros, como Robert Hooke e Francesco Grimaldi, acompanhavam Huygens, considerando que a luz poderia ser composta de ondas.

Podemos dizer que no final do século XVII e durante o século XVIII, tinha-se conhecimento de cinco fenômenos considerados básicos na óptica, assim divididos:

- Óptica Geométrica - Reflexão e Refração.
- Óptica Física - Difração, Interferência e Polarização (neste caso, faltava apenas uma comprovação experimental).

Para compreendermos os processos físicos da natureza ondulatória da luz, recorreremos à investigação das ondas mecânicas, apesar das características diferentes que ambas possuem; vejamos algumas:

- A forma como transportam energia. As ondas mecânicas o fazem pelo movimento vibratório do meio em que se propagam. As ondas luminosas não necessitam de um meio para se propagar.
- Suas velocidades são bastante diferentes;

No século XVII e XVIII, os fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência e polarização da luz eram compreendidos a partir do comportamento das frentes de ondas, propostas por Huygens, através de modelos geométricos. Uma maior compreensão desses fenômenos só foi possível no século XIX, quando Maxwell definiu as ondas eletromagnéticas e Hertz as comprovou experimentalmente. No item 2.6, discutiremos mais a respeito. Entender a reflexão e a refração de ondas luminosas, imaginando-as como partículas, da maneira como Newton pensava era simples e possível; no entanto, a difração e a interferência eram características essencialmente ondulatórias (GREF, 2002).

2.2 Princípio de Huygens

Em 1678, Huygens afirmava que a luz é uma série de ondas de choque, que se empurram através de uma substância invisível, o éter. Essas ondas se propagam muito depressa, mas não a uma velocidade infinita.

As ondas não tinham regularidades entre si e eram, pensava ele, emitidas por qualquer parte de um corpo luminoso. Ele concebeu a idéia de "pequenas ondas secundárias" com cada ponto à frente de uma de suas ondas de choque dando nascimento a outras ondas de choque, e assim por diante. Essas ondas secundárias eram usadas para explicar a reflexão e a refração (RONAN, 2001).

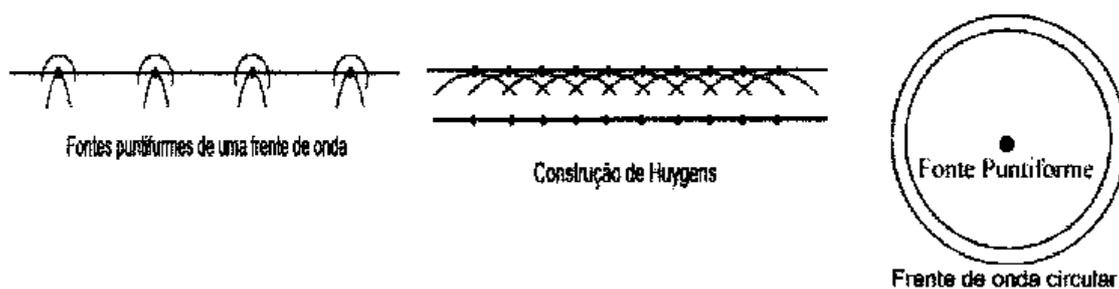
Segundo o princípio de Huygens, "todos os pontos em uma frente de onda funcionam como fontes de ondas secundárias esféricas. Em um instante posterior, a nova frente de onda é a tangente a estas ondas secundárias" (CHAVES, 2001, p. 70).

Construções com base no princípio de Huygens mostram como uma onda plana ou esférica mantém o seu caráter plano ou esférico durante a propagação, mantendo também o mesmo comprimento de onda e frequência igual ao da onda inicial.

Embora esse princípio produza resultados corretos, ele traz consigo implicações que devem ser consideradas. Huygens postulou que a ação das ondas secundárias está confinada às partes onde elas tocam seus envoltórios, e ele considerou somente essas partes do envoltório as quais se posicionam na direção frontal à da propagação. Não houve, porém, nenhuma justificativa física ou matemática para essa decisão arbitrária de ignorar as outras partes das ondas secundárias (NUSSENZVEIG, 1981).

Em algum momento, qualquer ponto da frente de onda primária é considerado um emissor contínuo de ondas esféricas secundárias, como na figura. Porém, se cada onda secundária irradia energia uniformemente em todas as direções, para gerar uma onda que se expande para frente, há que se considerar uma onda reversa movendo-se para trás, em sentido oposto ao da fonte. Dessa forma, o princípio de Huygens é incompleto. Esse detalhe só veio a ser resolvido quando Fresnel reformulou o princípio de Huygens, combinando-o com o "princípio da interferência de Young", no início do século XIX (NUSSENZVEIG, 1981).

Figura 1 - Construções das frentes de ondas, segundo Huygens



Fonte: HALLIDAY, RESNICK, 1976, p. 471.

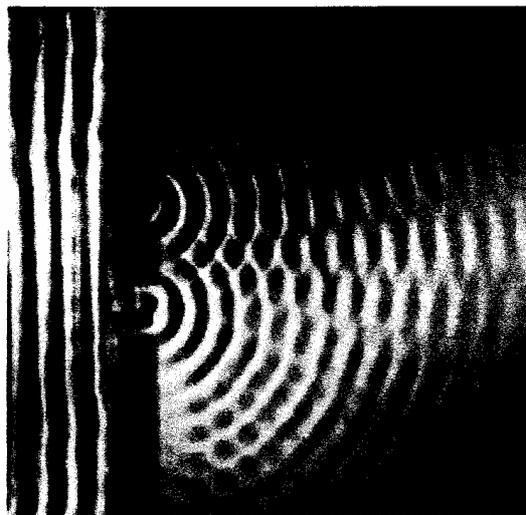
Com auxílio desse princípio, ele demonstrou as leis da reflexão e da refração da luz, mostrando inclusive que a velocidade da luz diminuía na água, contrariando as afirmações de Newton, que defendia a aceleração das "partículas luminosas", quando atraídas pelas partículas da água (BASSALO, 1987). A redução da velocidade da luz em meios mais densos só foi comprovada, teoricamente, no ano de 1850, por Louis Fizeau e, praticamente, por Leon Foucault, em 1862, durante a realização de uma experiência

sugerida por Arago. Com essa verificação, a hipótese ondulatória parecia ser definitiva e vencedora (OSADA, 1972).

2.3 Interferência de ondas

Para compreendermos como se dá o processo de interferência luminosa, podemos antes analisar como se dá a interferência das ondas produzidas numa experiência com a cuba de ondas. A figura 02 constitui uma demonstração dos efeitos da interferência de duas fontes de ondas na água. A interferência dessas ondas pode ser usada para visualizarmos a maneira como se forma um padrão de interferência de fenda dupla.(KELLER et al. 1999).

Figura 02 - Padrão de interferência de duas fontes puntiformes

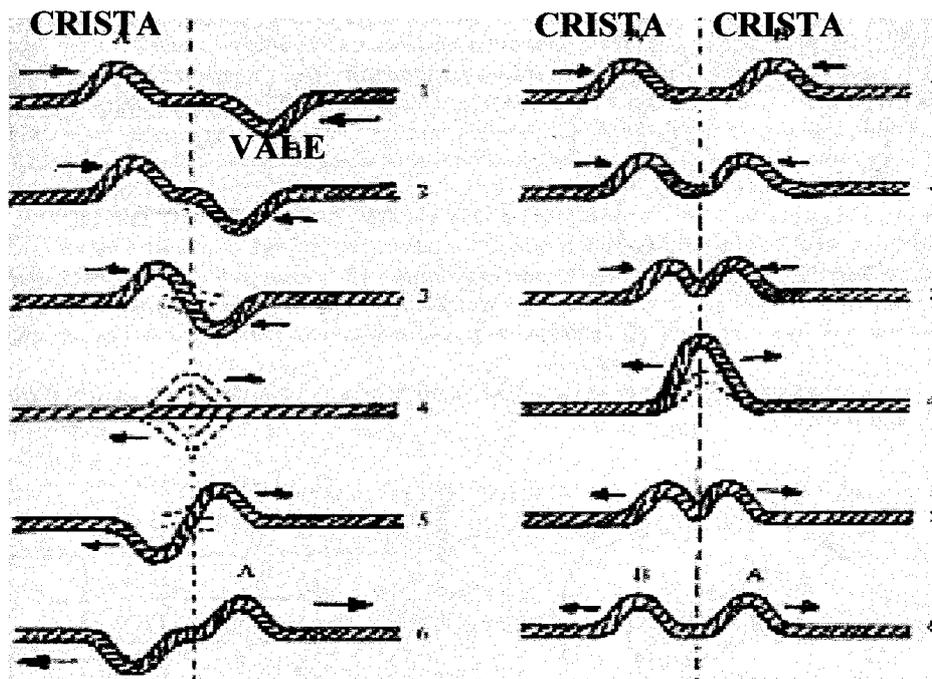


Fonte: KELLER et al, 1999, p. 451

Observando essa figura, percebe-se que quando duas fendas estreitas são colocadas na barreira do tanque de ondas, essas passam a se comportar como duas novas fontes puntiformes, emitindo trens de ondas circulares, um em cada fenda. Cada conjunto de ondas se espalha simultaneamente além da barreira e à medida que elas se propagam, mantêm-se coerentes, ou seja, com mesma frequência, mesmo comprimento de onda e mesma amplitude.

Se os pulsos de duas fontes distintas chegam a um mesmo ponto em fase, ocorre uma soma de efeitos, denominada de interferência construtiva (figura 3b). Se, no entanto, esses pulsos se encontram com certo atraso ou defasados, ocorrerá uma subtração de efeitos, denominada de interferência destrutiva (figura 3a) (GREF, 2002). Vejamos esses tipos de interferência através de pulsos em cordas:

Figuras 3a e 3b - Modelo de interferência destrutiva e construtiva em cordas, respectivamente.



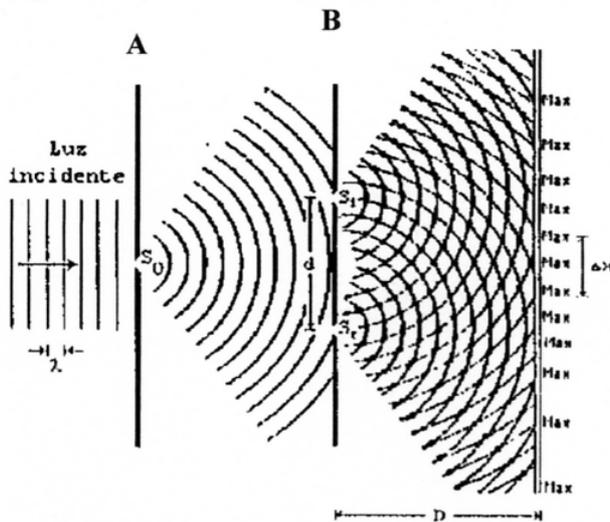
Fonte: GREF, 2002, p. 213

Quando se está lidando com interferência luminosa, porém, é mais apropriado falarmos em interferência de ondas coerentes. Isso porque a velocidade da luz é muito grande e um efeito no qual os pontos de mínimo (região escura) ou em defasagem e máximo (região clara) ou em fase, se alteram a todo instante seria praticamente impossível de ser visualizado nessas circunstâncias (NUSSENZVEIG, 1981).

Fazendo-se com que uma luz monocromática incida em um pequeno orifício S_0 , cuja abertura é menor do que seu comprimento de onda, aberto em um anteparo opaco A, notamos que a luz emergente se dispersa por difração e incide nos orifícios S_1 e S_2 (de mesma abertura que S_0) separados a uma pequena distância d no anteparo B. Ocorre aí nova difração, propagando-se duas ondas esféricas superpostas e coerentes, através do espaço, à direita do anteparo B, essas ondas ora se reforçam mutuamente (em fase), produzindo uma lista brilhante (interferência construtiva), ora estão defasadas,

anulando-se, produzindo uma lista escura (interferência destrutiva) (RIVAL, 1997). Vejamos essa explicação através da figura (05) abaixo, mostrando a difração e interferência luminosa:

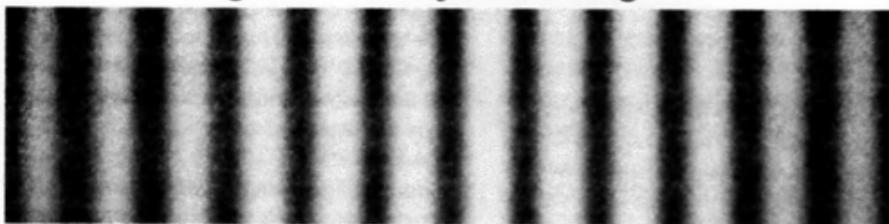
Figura 05 – Modelo de difração e interferência luminosa



Fonte: HALLIDAY, RESNICK, 1976, p.525

Na figura (figura 06), temos uma representação da interferência de uma luz monocromática, sobre um anteparo opaco. Os pontos escuros se dispõem segundo linhas chamadas franjas escuras (encontro de uma crista com um vale); os pontos mais luminosos se dispõem segundo linhas chamadas franjas brilhantes (encontro de duas cristas). O conjunto de todas as franjas é chamado figura ou padrão de interferência ou franjas de Young.

Figura 06 - Franjas de Young.



Fonte: KELLER *et al*, 1999, p. 450

2.4 Experiência de Young

O exemplo clássico de um experimento de interferência é creditado a Thomas Young, um físico e médico britânico, que no início do século XIX, em 1801, demonstrou que a interferência luminosa, assim como a interferência com ondas em uma cuba de água, era gerada pela passagem de um pincel luminoso através de duas fendas vizinhas muito

estreitas (a abertura das fendas deve ser da ordem do comprimento de onda da luz incidente). Desde que era impossível para Young interpretar esse fenômeno usando o mecanismo proposto por Newton, pelo choque de partículas luminosas com a superfície, ele concluiu que a luz deveria ter um caráter vibratório periódico, propagando-se num meio elástico e ténue, chamado de *éter*¹.

Essa demonstração possibilitou o estabelecimento da teoria ondulatória da luz numa firme base experimental. Em suas experiências, Young conseguiu deduzir o comprimento de onda da luz, sendo essa a primeira vez que a medida dessa importante grandeza foi realizada. Um pouco mais tarde (1815), Augustin Fresnel, igualmente adepto da teoria ondulatória da luz, elaborou métodos matemáticos que lhe permitiram determinar com precisão as propriedades quantitativas das interferências e da difração (BEN DOV, 1996).

Em 1909, o físico inglês Geoffrey Ingram Taylor repetiu a experiência de Young usando uma fonte fraquíssima - a luz de uma vela através de filtros escuros. O brilho da fonte luminosa usada por Taylor é equivalente ao da luz de uma vela a mais de uma milha (1,6 km) de distância. A intensidade foi calculada para que não mais do que um fóton entrasse pela fenda de cada vez. O detector usado por Taylor foi um filme fotográfico. Os que conhecem fotografia sabem que, quanto mais fraca a luz, maior deve ser a exposição do filme para que a imagem seja registrada. Após um mês de exposição ao feixe fraco (5×10^{-6} erg/s), o resultado foi surpreendente: o filme fotográfico revelava que, mesmo que os fótons entrassem pelas fendas um a um, o padrão de interferência era idêntico ao obtido com um feixe de luz. A difração não resulta da interferência entre os fótons, mas, paradoxalmente, "cada fóton interfere apenas consigo mesmo", como diria mais tarde Paul Dirac (BASSALO, 2000).

Diante das dificuldades detectadas, com a definição da luz, talvez fosse relevante considerar a posição de Fischler et al. (1992), que sugere que seria melhor abandonar a terminologia onda-partícula e afirmar que a matéria e a luz consistem de objetos quânticos de comportamentos totalmente diferentes de partículas ou ondas clássicas. Enquanto os professores continuarem a expressar a idéia de que a luz revela sua

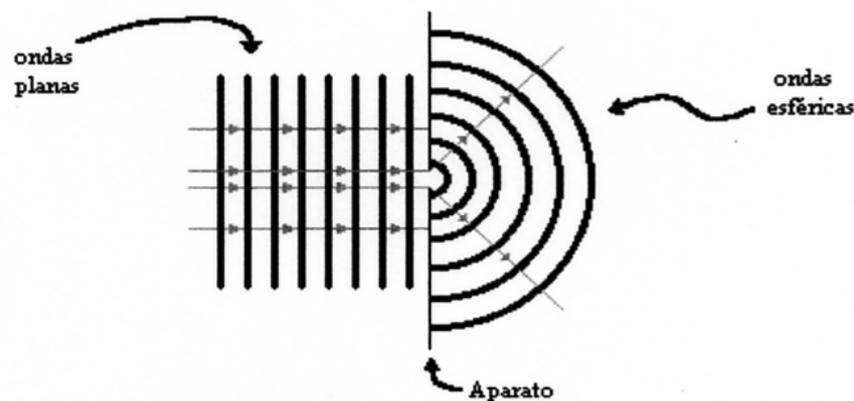
¹ Aristóteles considerava o éter como a quinta essência de que eram formados os corpos celestes além da terra e da lua. Para René Descartes era um meio perfeitamente elástico e transmissor da luz. No entanto, para Fresnel, o modelo de sólido para o éter luminífero era mais convincente, pois permitia a transmissão das vibrações transversais luminosas, através dele.

natureza de partícula em alguns experimentos, os estudantes apegar-se-ao ao conceito de "fótons", o qual é muito similar ao conceito clássico de partícula.

2.5 Difração de ondas luminosas

A figura 07 nos mostra uma ilustração de uma onda luminosa plana sendo difratada por uma fenda. Vê-se que a frente de onda plana com comprimento λ propaga-se, após a difração, de forma circular e com o mesmo comprimento λ como previa Huygens em seu princípio, ou seja, a fenda, cuja largura (a) é da mesma ordem de λ é considerada como um conjunto de fontes de ondas secundárias.

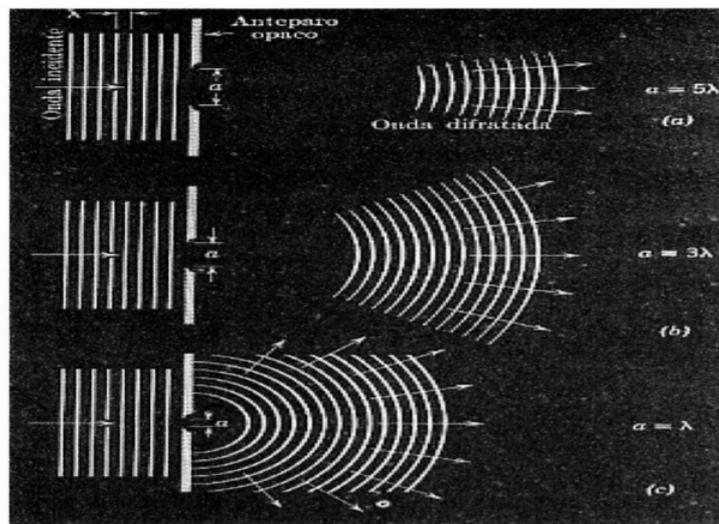
Figura 07 – Difração de ondas planas.



Fonte: HALLIDAY, D; RESNICK, R. 1976, p. 490

"O "encurvamento" da luz para a região de sombra geométrica está associado ao bloqueio das ondas de Huygens das partes da frente de onda incidente que estão atrás do anteparo" (HALLIDAY; RESNICK, 1976, p. 490):

Figura 08 – modelo de difração para a luz



Fonte: HALLIDAY, D; RESNICK, R. 1976, p. 490

Percebe-se, através da figura 08, a importância do valor da largura da fenda (a):

- Para $a = 5\lambda$, pouco encurvamento, parecendo deslocar-se em linha reta.
- Para $a = 3\lambda$ e $a = \lambda$ o encurvamento vai se tomando mais acentuado ou mais pronunciado.
- A difração foi descoberta pelo físico e jesuíta italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e anunciada em seu livro, dois anos depois de sua morte. Era um fenômeno conhecido tanto por Huygens (1629-1695) quanto por Newton (1642-1727). Este último não reconheceu nele nenhuma justificativa a favor da teoria ondulatória da luz, achando que ao passar em pequenas aberturas, a luz soffia uma inflexão devido às forças mútuas existentes entre os corpos materiais e as partículas luminosas, análogas às existentes na refração. Enquanto que Huygens, embora cresse nessa teoria, não acreditava na existência da difração. Acreditava ele que suas ondas secundárias só agiam efetivamente no ponto de tangência com a envolvente comum, negando, pois, a possibilidade de haver difração (HALLIDAY; RESNICK, 1976).

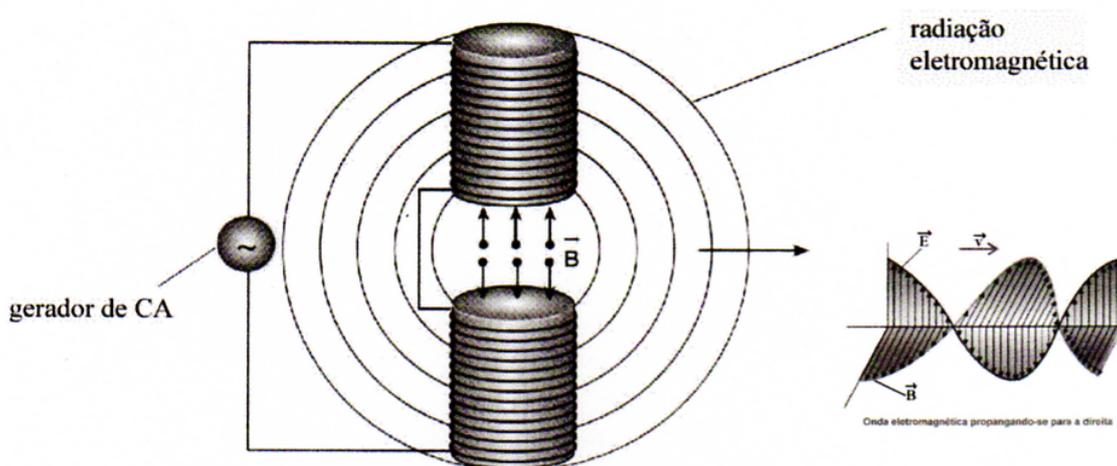
Grimaldi demonstrou, no relato de uma de suas experiências, que se um feixe de luz branca passar através de dois estreitos orifícios, situados um atrás do outro e, em seguida, atingir um anteparo branco, haverá neste anteparo umas regiões iluminadas, além daquela que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta (BASSALO, 1989).

Jean. Augustin Fresnel (1788-1827) usou corretamente o princípio de Huygens para explicar a difração, e usando o denominado princípio da interferência, calculou matematicamente as figuras de difração para os mais diversos obstáculos e aberturas, chegando a uma explicação satisfatória da propagação retilínea da luz. Esclareceu, portanto, que a difração da luz se toma cada vez menos pronunciada à medida que as dimensões da abertura se tomam progressivamente maiores que o seu comprimento de onda (ROCHA (org.), 2002).

2.6 Ondas eletromagnéticas estacionárias

Na segunda metade do século XIX (1864), o grande físico escocês James C. Maxwell mostrou teoricamente que, quando uma carga elétrica está em oscilação (acelerada e desacelerada), dá origem a campos elétricos e magnéticos que se propagam no espaço, a partir da carga, irradiando-se em todas as direções e podendo alcançar grandes distâncias. A sua importância para o estudo da eletricidade e do magnetismo é comparado àquela que Newton teve na mecânica, em virtude do caráter fundamental das leis que estabeleceu. Para Maxwell, seus trabalhos são traduções matemática do que ele considerava ser as idéias de Faraday unificada às leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Lenz e traduzidas em função de quatro equações fundamentais (equações de Maxwell) do eletromagnetismo. Maxwell mostrou, por meio de suas equações, que esse distúrbio eletromagnético, denominado de **onda eletromagnética** (ver figura 09), era produzido pela ação de dois campos elétricos e magnéticos, perpendiculares entre si, que ao se propagarem possuíam uma velocidade, próxima do valor da velocidade da luz, já determinada por Leon Foucault e Louis Fizeau, apresentando todas as características de um movimento ondulatório, como sendo reflexão, refração, difração, interferência e polarização. Mais ainda, seus resultados demonstravam que deviam existir radiações de menores ou maiores comprimentos de onda do que a luz (RONAN, 200 1).

Figura 09 - A propagação, através do espaço, de um distúrbio constituído pelos campos variáveis **E** e **B** denominada onda eletromagnética



Fonte: ALVARENGA, 2000, p. 323.



O triunfo do eletromagnetismo foi tão marcante que a Academia de Ciência de Berlim ofereceu um prêmio a quem conseguisse por meios experimentais gerar ondas eletromagnéticas. Assim, em 1887, o físico alemão H. Hertz, usando um circuito oscilante de pequenas dimensões, produziu ondas de pequeno comprimento, chamadas hoje de ondas hertzianas ou ondas de rádio, que embora não pudessem ser observadas visualmente, eram detectadas eletricamente e também podiam ser transmitidas e refletidas, além de se propagarem com velocidade da luz. O estabelecimento teórico da natureza eletromagnética para a luz, através das equações de Maxwell, unifica de forma elegante a óptica e o eletromagnetismo, definindo o comportamento ondulatório da luz (BEN DOV, 1996).

2.7 Efeito fotoelétrico

Quando Hertz, em 1887, conseguiu gerar e captar as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell, no seu histórico experimento, ele percebeu que faíscas de detecção no transmissor saltavam com mais facilidade quando os eletrodos da antena receptora estavam expostos à luz (violeta ou ultravioleta), aumentando a sensibilidade do detector, sendo que esses "raios" não eram constituídos de matéria e, portanto, só poderiam ser ondas. Ao comprovar a teoria de Maxwell, Hertz terminou abrindo o caminho para entendimentos futuros sobre o efeito fotoelétrico (NUSSENZVEIG, 1998).

Entretanto, em 1894, o físico alemão P. Lenard (assistente de Hertz), percebeu em seu experimento com a ampola de Crookes, uma série de características intrigantes em relação à física clássica, evidenciando aspectos da quantização. Os feixes de raios emitidos para o exterior da placa coletora (raios catódicos), eram constituídos de partículas carregadas negativamente. Entretanto, só em 1897, Thomson demonstrou que os raios catódicos, no tubo de Crookes, eram constituídos de corpúsculos carregados negativamente, chamadas posteriormente de elétrons e medindo sua relação entre sua carga e sua massa, comprovada em 1910 por R. Milikan.

Em 1902, P. Lenard publica em um artigo as seguintes leis do efeito fotoelétrico:

- O efeito fotoelétrico só ocorre a partir de uma determinada frequência;
- A quantidade de elétrons emitidos pela placa é proporcional à intensidade da luz incidente.
- A placa metálica deve estar limpa e polida.

Tentativas de entender o fenômeno observado usando a teoria clássica falharam e Lenard mais uma vez não soube explicar a influência da frequência no fenômeno, ou seja, tanto para luz fraca como forte, abaixo de certa frequência, o efeito não ocorria. Sendo assim, suas explicações eram incompatíveis com o modelo ondulatório já previsto na teoria do eletromagnetismo de Maxwell (BASSALO, 2000).

2.7.1 Explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico:

De forma elegante e original, em 1905, Einstein publicou um artigo onde explicava o efeito fotoelétrico, considerando a luz não mais como uma onda e sim como um conjunto de partículas constituídas de um pacote discreto de energia ou quanta de luz, chamado mais tarde de fótons, comprometendo toda a interpretação ondulatória desde Young a Maxwell, pois sendo partícula, como a luz poderia difratar e/ou sofrer interferência?

Segundo Einstein, as partículas de luz incidente transferem sua energia discreta (quantificada por Planck como sendo proporcional à frequência da luz incidente) para os elétrons (presos à placa metálica coletora) durante a colisão e que para serem liberados precisam receber certa dose de energia (função trabalho) capaz de superar sua energia de ligação. A diferença entre as energias era transformada em energia cinética, fazendo com que o elétron seja ejetado da placa, produzindo o efeito fotoelétrico (diferentes materiais precisam receber doses diferentes de energia para que seus elétrons sejam libertados). O grande detalhe apresentado por Einstein foi juntar numa mesma explicação aspectos da física clássica e da física quântica iniciada por Planck em fins do século XIX e comprovada experimentalmente por Robert A. Millikan em 1916 (BRAZ JUNIOR, 2002). Portanto, teria sido Einstein, nas palavras do físico italiano Emilio Segrè, o primeiro físico a falar da dualidade partícula-onda:

Voltemos agora ao primeiro dos dois trabalhos escritos por Einstein no surpreendente ano de 1905. Ao meu ver, é uma das maiores obras já realizada em física. Naquela época, os cientistas sabiam que a luz era constituída de ondas eletromagnéticas; se havia alguma coisa de certo, era isso. No entanto, Einstein tinha dúvidas e revelou a natureza dual da luz - corpuscular e ondulatória. Essa descoberta, junto com o aspecto dual correspondente da matéria, tomou-se a maior conquista do século. Newton e Huygens foram inesperadamente reconciliados por uma profunda revolução na filosofia natural, que mostrou estarem ambos, em parte, certos (SEGRE, 1987, p.89).

2.8 Difração de raios X

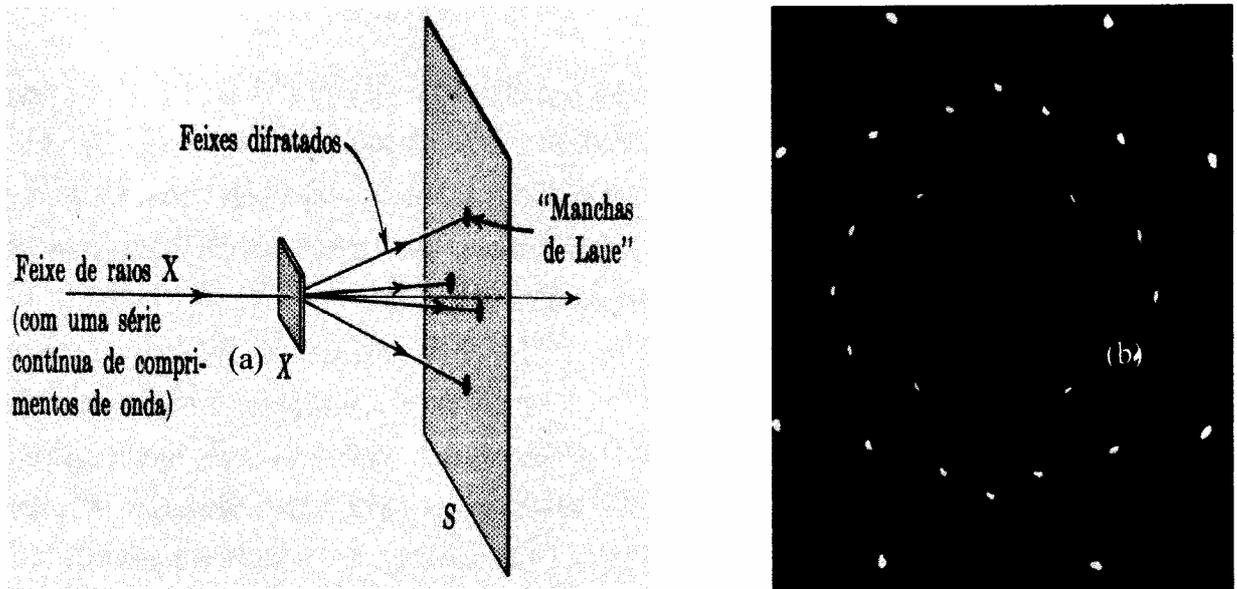
A descoberta dos raios-x por Roentgen em 1895, gerou controvérsias com relação a sua natureza, pois com um comprimento de onda muito pequeno tomava-se muito difícil observar o seu caráter ondulatório de reflexão, refração e difração, através do uso de objetos experimentais usados em óptica.

No início do século XX, não se conhecia exatamente a natureza dos raios X. haviam hipóteses que seriam fornadas por ondas eletromagnéticas longitudinais, partículas a altíssimas velocidades ou um par de partículas com cargas opostas, ondas eletromagnéticas transversais de altíssima frequência ou pulsos eletromagnéticos. Esta última hipótese ganhou força no início do século, sendo que em 1904 o físico inglês Charles Baffia publicou uma pesquisa onde comprovava o caráter transversal dos raios

X, através de uma experiência de polarização, e em 1911 ele demonstrou a sua dispersão através de partículas em suspensão.

Essas experiências convenceram o físico alemão Max Von Laue, em 1912, que os raios X eram ondas eletromagnéticas e que haveria uma possibilidade de realizar difração de raios X, utilizando uma estrutura cristalina como rede de difração tridimensional. Teoricamente ele imaginava ser à distância entre os átomos na rede cristalina igual ou menor do que o comprimento de onda dos raios X. As primeiras experiências foram realizadas por dois alunos de Laue, Walter Friedrich e Paul Knipping, usando os raios X de uma ampola de Crookes sobre um cristal de sulfeto de cobre. O resultado mostrou-se através de uma chapa fotográfica que ocorrera uma difração dos raios X. Logo depois Sir William Henry Bragg e seu filho Sir William Lawrence Bragg demonstraram a relação matemática e geométrica que passou a ser conhecida como lei de Bragg, fundamental para o estudo de estruturas cristalinas como uso da difração de raios X (MVAL, 1997).

Figura 10(a) - Um feixe não monocromático de raios X incide sobre um cristal de NaCl, sendo difratados em certas direções, formando o espectro de Laue. Figura 10(b) - Mancha, numa película fotográfica S.



Fonte: HALLIDAY; RESNICK, 1976, p. 599

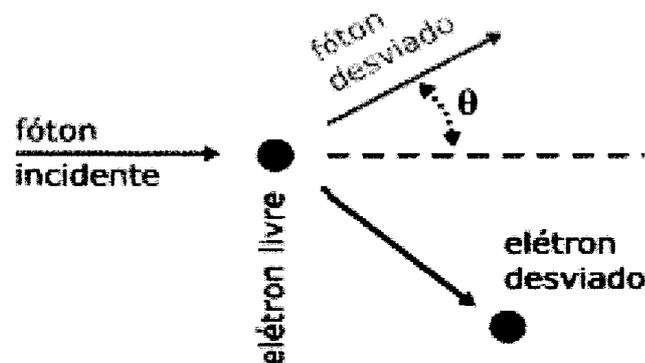
2.9 Efeito Compton

Na primeira década do século XX, o espalhamento de raios X pela matéria era explicado pela física clássica de J. J. Thomson. A evidência da existência dos fótons veio em 1923 através do trabalho teórico e experimental de Arthur H. Compton sobre o espalhamento de raios-x monocromático por elétrons situados num alvo de grafite, usando o mesmo procedimento da lei de Bragg (espectrômetro de Bragg para raios-x) para medida do comprimento de onda em função do ângulo de espalhamento. Em sua demonstração, Compton considerou que os raios-x se comportavam como o quantum einsteniano colidindo com elétrons, sendo que a energia e o momento linear eram conservados nesse espalhamento microscópico (BASSALO, 2000).

Compton determinou que os raios-x emergentes da placa de grafite eram de dois comprimentos de onda:

- Um era do mesmo valor da radiação incidente ($\lambda = \lambda_0$)
- O outro (o fóton) era maior ($\lambda' > \lambda_0$) e variava com o ângulo de espalhamento, gerando um deslocamento ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0$) chamado de deslocamento de Compton. Neste caso o fóton era espalhado pelo elétron, diminuindo sua energia e sua frequência após o espalhamento, aumentando o seu comprimento de onda (λ).
- Compton também verificou que o comprimento de onda espalhado λ' não dependia do material utilizado no alvo e que os raios-x incidentes deveriam interagir com os elétrons individuais, ou seja, um único fóton interagindo com um elétron.

Figura 11 - Espalhamento entre um fóton e um elétron livre



Fonte: NUSSENZVEIG, 1998, p. 255

O efeito Compton ocorre principalmente com elétrons livres ou fracamente ligados e pode ser explicado como uma absorção do fóton incidente pelo elétron livre. A energia deste fóton aparece repartida entre o elétron de recuo e um outro fóton de menor energia (ALONSO e FINN, 1972).

A Figura 11 dá a explicação quântica para o fenômeno: para não violar a lei da conservação da energia, a energia do fóton incidente deve ser igual à soma da energia do fóton desviado mais a energia do elétron desviado (a energia de ligação de um elétron ao seu átomo é menor que a energia de um fóton de luz) e, portanto a frequência do fóton desviado deve ser menor que a do incidente. Pela teoria ondulatória clássica da radiação pensada por Hertz, este fato não pode ser explicado. A radiação incidente deveria fazer os elétrons livres oscilarem na mesma frequência e, assim, a radiação dispersa teria idêntica frequência, de forma semelhante à antena de um transmissor de rádio (EISBERG, 1983).

Compton concluiu que a radiação eletromagnética também se comportava como partícula ao ser espalhada pela matéria, obedecendo às leis da conservação de energia e momento linear, dentro das previsões de Einstein. Em 1925, os físicos alemães Walter Bothe e Hans Geiger apresentaram em uma conferência o resultado de experiências que realizaram, nas quais foram confirmadas as leis da conservação da energia e do momento linear a nível microscópico do efeito Compton (BASSALO, 2000).

Embora o efeito Compton fosse favorável à hipótese corpuscular, tinham-se também evidências experimentais das ondas eletromagnéticas dos raios X, e não existia uma teoria que conciliasse os dois tipos de hipóteses.

2.10 Ondas de de Broglie

Em 1923, o francês Louis de Broglie publicou três trabalhos nos Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, relativo a sua tese de Doutorado, no qual relatava a idéia sobre onda de matéria associada a uma partícula relativista, encontrando as relações fundamentais entre a energia e as velocidades de fase e de grupo (BASSALO, 2000).

Intrigado com essa questão relativa aos trabalhos apresentados por Planck, Einstein e Compton de que as radiações eletromagnéticas, tidas como um tipo de onda, às vezes se comporta como se fosse composta de partículas, por uma questão estética (simetria) talvez devamos esperar que os átomos, elétrons e outros entes tidos como partículas, às vezes se comportem como ondas, apresentando uma periodicidade.

Motivado por tais idéias, de Broglie resolveu arriscar, sem conhecimentos experimentais, desenvolvê-las em sua tese de doutorado. Sua proposta era a de que a cada partícula (elétron, átomo, etc.) estaria associada uma "*onda de matéria*" que ditaria parcialmente o seu comportamento, ou seja, a "*onda de matéria*" pilotava a partícula em movimento de maneira indissociável. Essa onda teria uma frequência determinada pela energia da partícula através da mesma equação que Einstein usara para determinar a energia do fóton a partir de sua frequência. As oscilações das partículas e as oscilações da onda que a acompanha estão sempre em fase. Para a sua felicidade e a do seu orientador (Paul Langevin), Einstein apoiou sua idéia e assim de Broglie recebeu o seu título, em 1924 e, cinco anos depois, o Prêmio Nobel.

Para a confirmação experimental da sua idéia de Broglie sugeriu que a mesma poderia ser verificada projetando-se um feixe de elétrons sobre um cristal, onde efeitos de difração e interferência poderiam ser observados, como se fosse uma onda. Evidentemente, não havia comprovação experimental para tal fato; tudo era uma série de idéias especulativas.

Após a incorporação da idéia de de Broglie na teoria quântica desenvolvida entre 1925 e 1926 por Heisenberg e Schrödinger (ajudando na quantização da verdadeira equação de onda de elétrons), ela passou a ser levada a sério, ao mesmo tempo em que os físicos norte-americanos Clinton Davisson e L. Germer, em 1927, conseguiram demonstrar a existência de tais *ondas de elétrons*. Paralelamente, experimentos semelhantes foram realizados em Cambridge, Inglaterra, por George Thomson, filho do famoso J. J. Thomson, e por seu assistente Alexander Reid, além do físico russo P. S. Tartakovski. Os resultados dessas experiências confirmaram de modo inequívoco o comportamento ondulatório dos elétrons e Davisson e G. Thomson dividiram o Prêmio Nobel de

1937. É interessante observar que J. J. Thomson recebeu o Prêmio em 1906 por haver mostrado que o elétron é uma partícula, e que seu filho mereceu a mesma condecoração trinta e um anos mais tarde por haver mostrado que o elétron é uma onda! (NUSSENZVEIG, 1998) .

"Thomson (o filho) mostrou que os elétrons realmente difratam (em amostras Policristalinas) e interferem exatamente como a luz. Por isso ambos têm propriedades ondulatórias" (SEGRÈ, 1987; p. 156) . Os elétrons considerados como partículas desde a sua descoberta passaram a ter, com de Broglie, uma dupla personalidade. Como algo pode ser onda e partícula, assumindo comportamentos antagônicos? A luz pode se comportar como onda ou como partícula, dependendo da natureza do experimento. Ela não é nem uma coisa nem outra, mas, de certa forma, ambas! Tudo depende de como nós decidimos investigar suas propriedades.

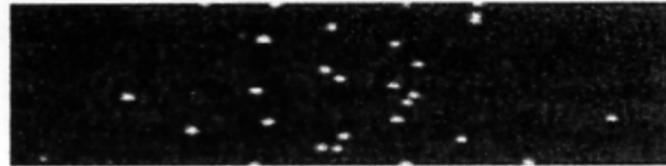
Os experimentos de Davisson e Thomson são fisicamente equivalentes à experiência de difração e interferência de ondas que atravessam dois orifícios próximos abertos em um anteparo, conforme vimos na experiência de Young. Isso ocorre tanto com a luz como com elétrons, nêutrons, etc., indicando que tais entidades comportam-se, pelo menos nesta situação experimental, como ondas. Não é possível explicar efeitos desse tipo sem recorrer a ondas. O que é misterioso é que em outras situações essas mesmas entidades comportam-se como partículas.

2.11 Difração de elétrons

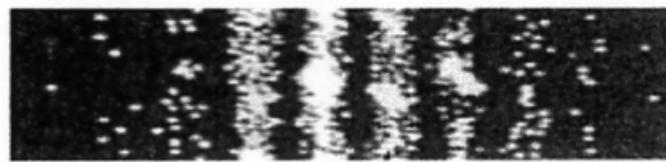
Começaremos com uma experiência mais simples, em vez de duas fendas (A e B), taparemos a fenda B e ficaremos com uma única fenda. Os fótons vão entrando um a um pela fenda A e atingem o filme. Depois de algum tempo teremos um borrão correspondente à forma da fenda, escuro (se o filme for negativo) na região correspondente à fenda e progressivamente mais clara na região ao redor desta, porque um número de fótons a atingiu. Repetimos a experiência tapando a fenda A e abrindo a fenda B. Novamente, obtemos o mesmo padrão: escuro na região da fenda, mais claro ao redor desta. Na verdade, o experimento com uma fenda não nos ensina muito, pois o padrão resultante seria o mesmo quer a luz seja onda ou partícula.

No próximo passo abriremos as duas fendas. Agora os fótons que entram um a um vão atingindo o filme e aos poucos o padrão característico das fi-anjas de interferência vai emergindo. Vejamos:

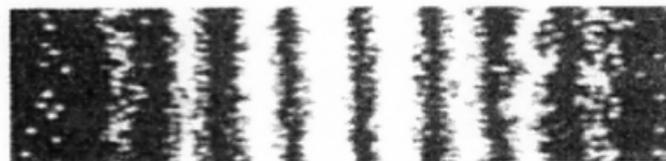
Figura 12 – Padrão real de interferência de elétrons.



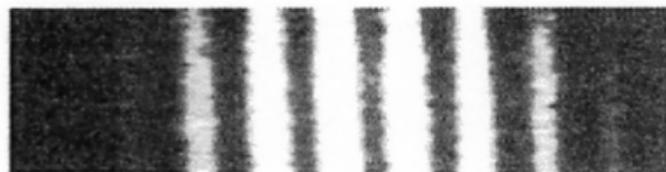
(a) Depois de 28 elétrons



(b) Depois de 1.000 elétrons



(c) Depois de 10.000 elétrons



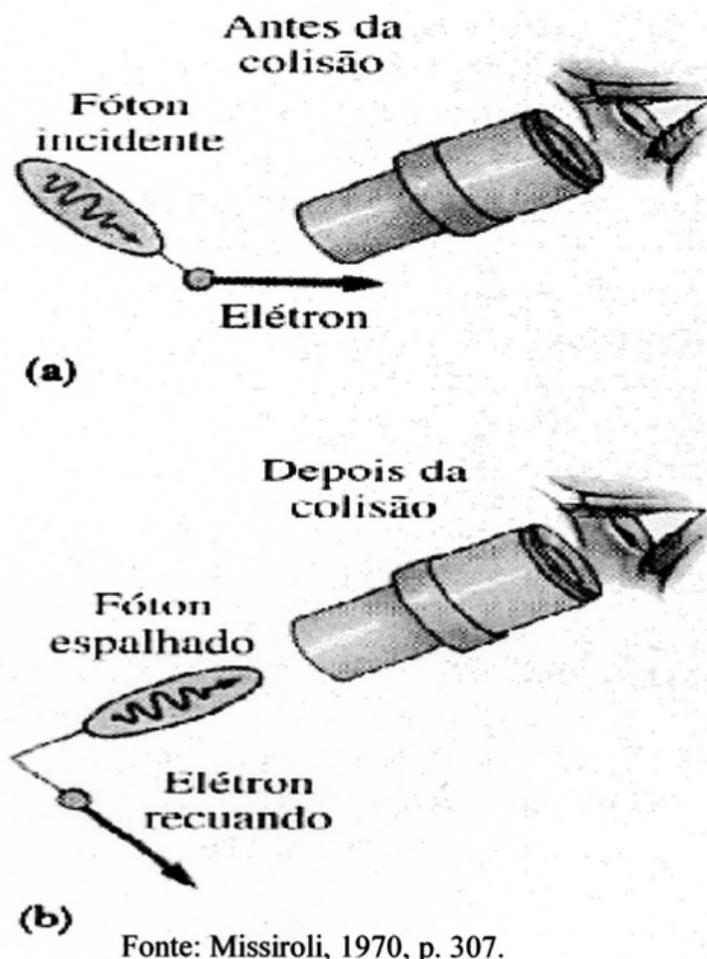
Fonte: Missiroli, 1970, p. 306.

O resultado mostrado através da figura 12 é idêntico ao do experimento original de Young, só que um pouco mais lento. Como é que isso pode acontecer? Se os fótons vão entrando um a um por uma das fendas, por que os resultados não são similares aos da experiência da fenda única, com dois borrões lado a lado? Se as fi-anjas de interferência no experimento original são resultados da interferência de uma parte da onda com outra parte, o que foi que interferiu com os fótons solitários? Como é que os fótons "sabem" que a outra fenda foi aberta?

Para descobrir, colocaremos detectores nas fendas para determinar a cada momento qual delas está sendo atravessada por um fóton. Após a instalação dos detectores repetimos a experiência, novamente com um fóton de cada vez. Uma coisa inesperada acontece – o

fóton entra pela fenda A ou B, nunca pelas duas ao mesmo tempo. Esse é o paradoxo da experiência das fendas duplas: quando não sabemos através de qual fenda o fóton passou, a luz se comporta como onda; quando sabemos, comporta-se como partícula, destruindo o seu padrão de interferência. Portanto, determinação da trajetória de um fóton muda o seu comportamento.

Figura 13 – modelo de observação com alteração e interferência de elétrons



Quando "olhamos" para os elétrons, sua distribuição no filtro é diferente de quando não o fazemos. Será que ligar nossa fonte de luz é o que perturba as coisas?

Para Feynman, ao tentarmos "observar" os elétrons, mudamos os seus movimentos (figura 13), ou seja, o solavanco dado pelo fóton no elétron altera o seu movimento, o suficiente para que não haja interferência; se não olharmos, teremos interferência (FEYNMAN, 1999). Portanto, é impossível observar-se por qual fenda o elétron passa sem ao mesmo tempo destruir a sua interferência quântica.

2.11.1 Experimento da dupla fenda. A interpretação de Copenhagen.

Essa interpretação, também conhecida como ondulatória-positivista, desenvolvida principalmente por Niels Bohr, requer o conceito de "função de onda". Quando um fóton é disparado pela fonte, o que se dirige às fendas é uma função de onda. A função de onda não é aleatória, pois se propaga conforme as leis conhecidas da propagação de ondas, e seu comportamento são previsíveis. Como qualquer onda, move-se em todas as direções e interfere consigo própria.

De acordo com a interpretação de Copenhagen, a função de onda representa a probabilidade de um fóton estar em algum lugar em particular. A questão "onde está o fóton" não tem sentido neste ponto - o fóton é uma onda de probabilidade que se propaga. Tem probabilidade maior de estar em alguns pontos do que em outros. A interferência da função de onda consigo própria dá origem a regiões de probabilidade mais alta, se a interferência for construtiva ou de probabilidades mais baixas, se a interferência for destrutiva. Algo acontece quando se mede a posição do fóton: ocorre o "colapso" da função de onda. A medição tem a propriedade de "forçar" o fóton a escolher uma posição dentre as inúmeras possíveis naquele instante.

Quando um fóton é emitido na direção das fendas, a função de onda propaga-se do emissor, passa através de ambas as fendas e atinge o filme fotográfico. Ao passar pelas fendas a função de onda interfere consigo própria e cria um padrão de interferência semelhante ao de qualquer outra onda, exceto por ser um padrão de probabilidades. Ao atingir o filme fotográfico, a função de onda colapsa e a posição do fóton é definida. Mesmo que entrem um a um, mais fótons atingem as regiões de alta probabilidade e apenas uns poucos atingem as regiões de baixa probabilidade, criando as franjas de interferência.

Quando colocamos detectores nas fendas, produzimos o colapso da função de onda antes que a função de onda tenha a oportunidade de interferir consigo própria (NUSSENZVEIG, 1998). Desta forma temos conjuntamente uma característica ondulatória, a interferência, e uma característica corpuscular, a detecção pontual ("bem

localizada") dos quanta. Além dessa interpretação, existem outras três apresentadas por Pessoa Junior (2003), em seu livro e mais recentemente por Ostermann e Ricci, (2005):

- Interpretação dualista-realista (De Broglie e David Bolim)

Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria da "onda piloto", e ampliada por David Bolin que incluiu o aparelho de medição. Essa interpretação é também conhecida como teoria das variáveis ocultas. Tenta conciliar o fenômeno ondulatório com o fenômeno corpuscular na mesma experiência, ou seja, o objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula (fóton ou elétron) com trajetória bem definida (mas desconhecida) e energética, e uma onda a ele associada (onda piloto). A probabilidade da partícula se propaga em certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partículas.

- Interpretação ondulatório-realista (Schödinger)

Este ponto de vista considera que a função de onda quântica corresponde a uma realidade ondulatória. A visão ondulatória era defendida explicitamente por Erwin. Schrödinger, mas ele encontrou extrema dificuldade em dar conta dos fenômenos sem a noção de colapso. Os objetos quânticos são pacotes de ondas (fóton e elétron), ou seja, antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula, sem que ambos coexistam simultaneamente.

- Interpretação Corpuscular-realista (Alfred Landé)

Este é o ponto de vista segundo o qual as entidades microscópicas (ou pelo menos as possuidoras de massa de repouso) são partículas, sem uma onda associada. Esta posição foi defendida por Alfred Landé, dentro da interpretação dos ensembles (coletivos) estatísticos, ou seja, o fóton e o elétron seriam na realidade uma partícula, o que é manifestada quando o detectamos. Não existe uma onda associada e o padrão de interferência é explicado a partir da interação da partícula com o anteparo que contém as duas fendas. A grande dificuldade da abordagem corpuscular é explicar os padrões de interferência obtidos em experimentos com elétrons. Apesar deste problema não ter sido satisfatoriamente

superado, é muito comum encontrarmos interpretações corpusculares na literatura e também, entre os alunos.

Todas estas interpretações dadas ao elétron durante o experimento da dupla fenda, foram discutidas e analisadas em sala de aula, durante a fase dos encontros, do Ciclo da Experiência Kellyana, mostrando a importância de cada uma delas, sua visão histórica e experimental. A pluralidade das interpretações usadas na MQ, dá sustentação teórica ao fenômeno citado, uma vez que a maioria dos professores costuma trabalhar só com a interpretação da complementaridade.

A seguir, trataremos das bases teóricas da Teoria dos Construtos Pessoais, de George Kelly, usada na nossa pesquisa, como um procedimento didático e metodológico, de modo a colaborar no processo de ensino e aprendizagem, em relação a assuntos considerados abstratos da MQ.

2.12 Teoria dos Construtos Pessoais (TCP)

A Teoria dos Construtos pessoais desenvolvida por George Kelly foi publicada em 1955, baseada numa filosofia de construção do conhecimento, chamada por ele de alternativismo construtivo. De acordo com essa visão, as pessoas constroem modelos provisórios para compreenderem a si mesma, os fenômenos ao seu redor, predizer e controlar eventos futuros. Esses modelos racionais são avaliados por critérios pessoais e alterados de acordo com os resultados dessa avaliação (BASTOS, 1992).

"Todas as nossas interpretações do universo estão sujeitas à revisão ou substituição" (KELLY, 1970, p. 15).

As pessoas são livres para escolher como querem ver o mundo e seus comportamentos decorrem dessas escolhas; elas são responsáveis por suas idéias e por suas mudanças (BASTOS, 1992).

"O ser humano não se limita a viver no universo respondendo a seus estímulos, mas possui a capacidade de representá-lo; isto implica que o homem pode realizar representações ou construções diferentes/alternativas a respeito do mesmo e modificá-lo, se está em desacordo com ele" (MINGUET, P. A, (org.), 1998, p. 150).

Kelly nos mostra ainda que exista um paralelo comum entre um cientista e uma pessoa (homem-cientista), quando os mesmos desenvolvem hipóteses sobre determinado evento, ou seja, assim como os cientistas, os indivíduos desenvolvem expectativas sobre as conseqüências de seu comportamento e as avaliam em termos de exatidão do que pretendia. Essas previsões eventuais podem ou não ser refutadas, ou seja, o que importa é o que ele faz com essas previsões (MOREIRA, 1999).

"Esse homem-cientista empenhado desde sempre na predição e no controle, na observação e análise do mundo, enfrenta esta tarefa através de pautas criadas por ele mesmo, que, constantemente, confronta com realidades do universo" (MINGUET, P. A, (org.), 1998, p. 15 1).

O cientista desenvolve conceitos para descrever e interpretar os eventos que lhe interessam. O conceito chave de Kelly para o homem, como cientista, é o construto. São características que o indivíduo usa ao categorizar acontecimentos e estabelecer um roteiro de comportamento, visualizadas como eixos que possuem pólos dicotômicos (PERVIN, 1978).

A teoria de Kelly é apresentada a seguir através de um postulado fundamental e onze corolários; (KELLY, 1970, tradução livre):

- Postulado fundamental

Kelly propõe que o entendimento que a pessoa tem do mundo e seu comportamento, são dirigidos por uma rede existente de expectativas em relação ao que vai acontecer, se ela agir de determinada maneira, antecipando eventos (BASTOS, 1992).

"Os processos de uma pessoa estão psicologicamente canalizados pelas maneiras como tal pessoa antecipa os acontecimentos" (KELLY, 1970, p. 69).

Este é o preceito fundamental no qual se baseia a teoria psicológica das construções pessoais, ou seja, à medida que constrói as réplicas dos eventos, modifica sucessivamente seus construtos a serviço de previsões mais acuradas e eficientes de seu ambiente (PERVIN, 1978).

- Corolário da construção - "uma pessoa antecipa eventos construindo suas réplicas"; com a finalidade da previsão antecipatória, as pessoas elaboram réplicas dos acontecimentos do cotidiano, que lhes servem para prever os eventos do amanhã (MINGUET, P. A, (org.), 1998, p. 153).
- Corolário da individualidade - "As pessoas diferem umas das outras nas suas construções de eventos". Para Kelly, tais maneiras diferentes de antecipar eventos, é à base da psicologia das diferenças individuais.

- Corolário da organização - "cada pessoa, caracteristicamente, desenvolve, para sua conveniência na antecipação de eventos, um sistema de construção incorporando relações ordinais entre construtos". Construções diferentes comportam, as vezes, predições incompatíveis.
- Corolário da dicotomia - "O sistema de construção de uma pessoa é composto de um numero finito de construtos dicotômicos". O indivíduo elabora um número determinado de construções bipolares, classificados em termos de semelhança e contraste.
- Corolário da escolha - "a pessoa escolhe para si aquela alternativa, em um construto dicotomizado, por meio da qual ela antecipa a maior possibilidade de extensão e definição de seu sistema de construção". Cada indivíduo vai escolhendo para si mesmo as alternativas que considera verdadeiras para ir progressivamente estendendo e definindo seu próprio sistema.
- Corolário do âmbito - "um construto é conveniente apenas para a antecipação de um âmbito limitado de eventos".
- Corolário da experiência - "O sistema de construção de uma pessoa varia à medida que ela constrói, sucessivamente, réplicas de eventos". As interpretações que damos aos eventos representam hipóteses sobre as consequências dos comportamentos, e nós usamos os resultados reais para validar o sistema de construtos.
- Corolário de modulação - "a variação no sistema de construção de uma pessoa é limitada pela permeabilidade dos construtos dentro dos âmbitos de conveniência em que as variantes se situam~'. Uma construção é permeável quando admitem em seu âmbito elementos novos; quer dizer, quando se podem acrescentar novas experiências e novos fatos àquilo que abrange.
- Corolário da fragmentação - "uma pessoa pode empregar, sucessivamente, uma variedade de subsistemas de construção que são inferencialmente incompatíveis entre si".

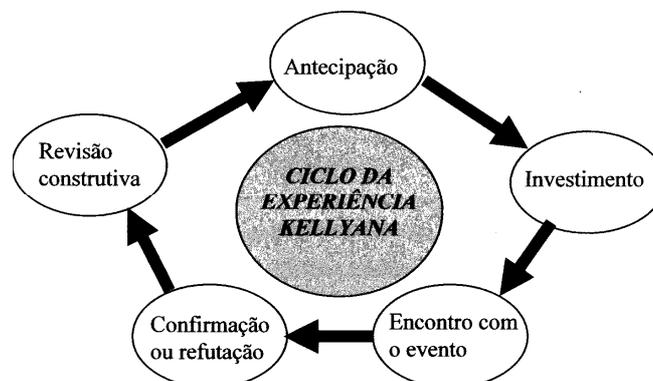
- Corolário da comunalidade - "Na medida em que uma pessoa emprega uma construção da experiência que é similar àquela empregada por outra pessoa, seus processos psicológicos são similares ao da outra pessoa.
- Corolário da sociabilidade - "na medida em que uma pessoa constrói os processos de construção de outra, ela pode ter um papel em um processo social envolvendo a outra pessoa.

2.13 Ciclo da Experiência Kefiyana

Uma pessoa chega à aprendizagem, segundo Kelly, quando ao longo das várias tentativas de lidar com o evento, ela muda sua estrutura cognitiva para compreender melhor suas experiências, semelhante ao cientista que utiliza o método experimental para ajustar suas teorias.

Essas construções pessoais são hipóteses de trabalho que se confrontam com as experiências; estão sujeitas a constante revisão e re colocação. Ao contrastar as previsões antecipatórias com os acontecimentos, produz-se uma evolução progressiva de tais previsões. A própria experiência, segundo Kelly, é considerada com sendo conformada por construções sucessivas de acontecimentos. O processo da aprendizagem das pessoas se desenvolve segundo o ciclo da experiência Kellyana, composto de cinco etapas, representadas através da figura abaixo.

Figura 14 – Ciclo da Experiência Kellyana



Fonte: CLONINGER, 1999, p. 427.

- Antecipação - Nessa fase o aluno recebe o convite para participar do projeto de pesquisa cujo tema é a difração de elétrons. Utilizaremos o Ciclo da Experiência Kellyana como uma possibilidade de evolução em suas concepções sobre difração de elétrons, aproximando-se mais de conceitos cientificamente aceitos. Espera-se que os alunos de MQ e FM a serem pesquisados, já possuam informações a respeito deste assunto e, portanto farão um pré-teste, com a intenção de verificar suas concepções. A antecipação é o momento de resgate, de dúvidas, cujo objetivo é fazer com que o aluno reveja assuntos antes ministrados. É o começo do processo de aprendizagem. (BASTOS, 1992).
- Investimento - Na segunda fase a pessoa sente a necessidade de investir no evento, tendo contato com livros, textos, pesquisas na Internet, buscando informações que faltam para que ele possa embasar-se com o assunto, passando a ter um conhecimento diferente daquele que ele tinha (BASTOS, 1992).
- Encontro com o evento - Na terceira fase tem-se o encontro com o conhecimento; é nessa fase em que o professor ministra suas aulas teóricas e experimentais, com diversos recursos didáticos, como quadro, data-show, retro-projetor, experiências virtuais, etc. A utilização e a intenção desses vários recursos é levar os alunos a refletirem sobre suas concepções, comparando-as com as cientificamente aceitas, gerando um conflito cognitivo (BASTOS, 1992).
- Confirmação ou refutação dos conhecimentos - Através do conflito cognitivo gerado no momento do encontro, o aluno será levado a refletir a respeito de suas concepções sobre difração de elétrons, confirmando-as ou não. Percebe-se, portanto, que à medida que o aluno vai interagindo com o assunto, no momento do encontro, dar-se também a sua validação, ou seja, ele é levado a rever ou não idéias anteriores, sempre através de comparação com as informações adquiridas antes e após os encontros, gerando conflitos cognitivos (conhecimentos formais x conhecimentos científicos).

- Revisão construtiva - É o momento em que o aluno faz uma revisão de seus conhecimentos. O professor pode realizar várias atividades como entrevistas, debates, palestras, etc, que possibilitam essa revisão.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, optamos por uma abordagem qualitativa, uma vez que nossa fundamentação teórica está centrada na Teoria dos Construtos Pessoais de Kelly (1970), visando compreender melhor as implicações do Ciclo da Experiência Kellyana no processo de aprendizagem. Quando afirmamos que privilegiamos a abordagem qualitativa, fomos buscar alguns fundamentos em Oliveira (2003), que afirma:

A abordagem qualitativa facilita descrever a complexidade de problemas e hipóteses, bem como analisar a interação entre variáveis, compreender e classificar determinados processos sociais, oferecer contribuições no processo das mudanças, criação ou formação de opiniões de determinados grupos e interpretação das particularidades dos comportamentos ou atitudes dos indivíduos (p. 58).

Assim, optando pela abordagem qualitativa esperamos compreender, descrever e oferecer subsídios para melhoria do processo ensino-aprendizagem, mais especificamente quanto ao ensino das disciplinas de Física Moderna (FM) e Mecânica Quântica (MQ) nos cursos de Licenciatura em Física, em relação ao conceito de difração de elétrons, segundo os princípios norteadores da teoria de Kelly. A nossa pesquisa também se configura como uma pesquisa descritiva, em que descrevemos em detalhes, fatos e fenômenos encontrados num caso específico.

Elegemos o método de *estudo de caso* para nossa pesquisa de campo, utilizando como instrumentos de coleta de dados o questionário de perguntas abertas e a entrevista. O primeiro instrumento foi escolhido por permitir uma maior liberdade nas respostas, sem influência do pesquisador, tendo sido aplicado em diversas ocasiões. A entrevista se diferencia do questionário por estabelecer uma relação direta entre o pesquisador e o entrevistado, permitindo resgatar alguns aspectos que não ficaram claros no questionário. Justifica-se a opção por esse método do estudo de caso, visto que para Yin (2005), o *estudo de caso* é uma estratégia metodológica do tipo exploratório, descritivo e interpretativo, que facilita a compreensão de fenômenos sociais complexos:

O método de estudo de caso permite uma investigação para se preservar as características holísticas e significativas dos acontecimentos da vida real, tais como: ciclos de vida individuais, processos organizacionais e administrativos, mudanças ocorridas em regiões urbanas, relações internacionais e a maturação de setores econômicos (p. 20).

Como se pode verificar nessa citação, o estudo de caso é um método eclético e se aplica em diferentes áreas de conhecimentos.

3.1 Procedimento metodológico da pesquisa

A pesquisa foi estruturada em tomo de uma intervenção didática que utilizava as cinco etapas do Ciclo da Experiência Kellyana, (antecipação, investimento, encontro, confirmação ou refutação e revisão construtiva) distribuídas em dez reuniões, com duração média de duas horas cada. Adotamos o seguinte procedimento metodológico na obtenção dos dados desta pesquisa:

- No dia seguinte à explicação de todo o processo de pesquisa, seguido do convite aos alunos, que constituiu a primeira parte da etapa de antecipação, prevista no Ciclo da Experiência Kellyana, foi aplicado um questionário (pré-teste, ver apêndice A) com o objetivo de buscar informações sobre as concepções dos alunos acerca da difração de elétrons. Como a antecipação é o momento de rever assuntos antes ministrados, resgatar o que foi compreendido e de identificar dúvidas, o questionário buscava informações colhidas durante seminários, palestras e trabalhos de pesquisa realizados ao longo do curso de Licenciatura em Física. Segundo Bastos (1992), a antecipação é o começo do processo de aprendizagem.

Tivemos o cuidado de não influenciar as respostas dos alunos, citando, no nosso primeiro encontro-convite, que durou cerca de trinta minutos, apenas o tema, no intuito de gerar expectativas, para no outro dia ser aplicado o pré-teste, com cinco questões, respondidas durante um período de sessenta minutos e analisadas na seção 4. 1. O pré-teste foi aplicado a 15 alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba. -UEPB, assim distribuídos: 05 alunos de Física Moderna (FM) e 10 alunos de Mecânica Quântica (MQ). Nosso objetivo inicial foi diagnosticar a

existência de erros conceituais, sobre a difração de elétrons, nas duas turmas. Em seguida, comparamos esses resultados com aqueles apresentados na literatura, conduzidos por Fletcher *et al* (1998), Fischler *et al* (1992), Masshadi (1996), Montenegro (2000), Ambrose *et al.* (1999), Ostermann e Ricci (2005), que concluem que alunos que cursaram essas disciplinas não compreendem os conceitos quânticos ali propostos, em especial difração e interferência em fenda dupla e única para a luz, dualidade onda-partícula, difração e interferência em fenda dupla utilizando elétrons, limitando-se, em geral, a dominar o seu formalismo matemático.

- Investimento - Na segunda etapa do Ciclo da Experiência Kellyana a pessoa se prepara para participar ativamente do evento, que no caso desta pesquisa corresponde a uma discussão sobre a difração de elétrons, tendo contato com livros, artigos, pesquisas na Internet, buscando informações sobre o assunto, passando a ter um conhecimento diferente daquele que anteriormente possuía (BASTOS, 1992).

Nesta intervenção, o momento do *investimento* ocorreu no dia seguinte à aplicação do préteste, durando cerca de quarenta minutos. A partir deste momento, a pesquisa foi realizada com sete dentre os dez alunos da disciplina de Mecânica Quântica (MQ), que participaram da primeira etapa (houve três desistências). A razão pelo qual utilizamos os alunos de MQ foi ter constatado que apesar de seus estudos mais aprofundados na Mecânica Quântica (MQ) (ver programas nos anexos 1 e 2), em relação aos alunos de Física Moderna (FM), eles apresentavam os mesmos erros conceituais em conceitos básicos da MQ, como os envolvidos no experimento da fenda dupla para um único elétron.

Nessa ocasião, os sete alunos de MQ receberam um texto retirado da nossa fundamentação teórica (p. 06 a 28), que trata da formação de ondas desde o Princípio de Huygens e das interpretações dadas pela MQ à difração de elétrons. Eles também foram incentivados a buscar outras informações na Internet, livros, artigos e a realizar leituras diversas a respeito do tema a ser estudado. Os alunos ficaram à vontade para realizar suas pesquisas durante uma semana. Ao término desse período, tivemos outro encontro,

durante o qual aplicamos outro questionário (ver apêndice B), com duração de cinquenta minutos, cujas respostas serão analisadas na seção 4.3. 1.

- Encontro com o evento - Na terceira etapa tem-se o encontro com o evento. É nessa etapa que o professor apresenta um conjunto de conceitos teóricos, juntamente com uma série de experimentos envolvendo esses conceitos, utilizando diversos recursos didáticos, como quadro, data-show, retro-projetor, experimentos virtuais e concretos. O objetivo desta etapa é levar os alunos a refletirem sobre suas concepções, comparando-as com as cientificamente aceitas, analisando os diversos conflitos cognitivos que surgirem (BASTOS, 1992).

As atividades realizadas nessa etapa foram organizadas a partir da análise dos resultados do pré-teste, tendo começado na semana seguinte à aplicação do questionário do investimento. Foram distribuídas em duas aulas, com uma duração de cerca de duas horas cada, em semanas consecutivas. Cada uma dessas aulas foi seguida pela aplicação de um questionário no dia seguinte à sua realização. O objetivo principal dessas aulas era mostrar conceitualmente, historicamente e experimentalmente as diferenças entre fenômenos ondulatórios e corpusculares, dualidade onda-partícula, bem como a difração de elétrons.

Na 1ª aula expositiva (ver plano de aula no apêndice C) foram tratados, teoricamente, assuntos que se referiam à formação de uma onda plana ou curva, a partir do modelo de Huygens, os fenômenos da difração e interferência da luz proposta por Young e a experiência do efeito fotoelétrico proposta por P. Lenard, com as respectivas hipóteses de Einstein para a sua explicação. Em seguida, foi realizada uma parte experimental, na qual tivemos a utilização de molas helicoidais e cordas, para melhor esclarecer as características ondulatórias, com seus respectivos fenômenos, o uso de uma cuba de onda, para demonstração da difração e interferência das ondas mecânicas na água, bem como a formação de ondas planas e curvas, o uso da luz do laser sobre um fio de cabelo (cílios, pena de ave) na demonstração da difração e interferência da luz, o uso de lâminas transparentes e do retro projetor na demonstração da interferência da luz.

Tivemos ainda nessa aula uma demonstração de uma experiência virtual (applet) sobre a difração e interferência da luz, em fenda simples e dupla, retirada do sítio: "<http://www.falstad.com>". Para melhor compreensão sobre o efeito fotoelétrico, utilizamos um software disponível em JAVA, na Internet (<http://www.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectronico/fotoelectronico.htm>), que permite verificar que a energia cinética dos elétrons emitidos independe da intensidade da luz incidente, mostrando uma dependência dessa energia com a frequência da radiação incidente.

No dia seguinte, aplicamos um questionário (ver apêndice D), chamado de questionário da confirmação/refutação (P aula), para identificar os novos construtos, cujas respostas serão analisadas na seção 4.3.2.

Na semana seguinte tivemos a 2ª aula (ver plano de aula no apêndice E). É importante ressaltar que no início dessa aula foram analisadas todas as dúvidas da aula anterior. Nesse momento foram evidenciados aspectos ondulatórios e corpusculares dos elétrons, de forma teórica e experimental (virtual), levando-se em conta quatro interpretações comumente utilizadas na MQ, por professores e alunos. Não houve, por nossa parte, nenhuma tomada de posição em relação às interpretações dadas. Na experiência virtual ou bancada virtual utilizada para observação da difração em fenda dupla de elétrons, com a formação do padrão de interferência, tinha-se a possibilidade de se alterar a largura da fenda, o número e tipo de partículas emitidas (fótons ou elétrons) e a distância entre as fendas, permitindo que fossem explorados os aspectos ondulatório e corpuscular. Esse software livre pode ser acessado através do endereço:

["http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html"](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html). A necessidade de se utilizar esse experimento virtual está na própria natureza sofisticada do experimento, de difícil reprodução em laboratórios de ensino. Não tivemos a intenção de tornar simplista ou superficial a difração de elétrons, com o uso dessa tecnologia, mas de tornar acessíveis os conceitos físicos envolvidos na simulação dos experimentos virtuais, fugindo assim de uma abordagem mais tradicional, em que se enfatiza o formalismo matemático.

No dia seguinte, aplicamos um questionário (ver apêndice F), chamado de questionário da confirmação/refutação (2ª aula), para identificar os novos construtos, validados nessa 2ª aula, cujas respostas serão analisadas na seção 4.3.3.

- Confirmação ou refutação dos conhecimentos - Através do conflito cognitivo gerado no momento do encontro, o aluno é levado a refletir a respeito de suas concepções sobre difração de elétrons, confirmando-as ou não. Percebe-se, portanto, que à medida que o aluno vai interagindo com o assunto, no momento dos encontros, dá-se também a sua validação, ou seja, ele é levado a abandonar ou não idéias anteriores, sempre através de comparação com as informações adquiridas antes e após os encontros (BASTOS, 1992).

Essa etapa ocorreu paralelamente ao encontro com o evento, pois à medida que realizávamos as aulas-encontro, no outro dia aplicávamos um questionário, que serviu como validação ou não das hipóteses construídas por eles, ou seja, nessa etapa, os alunos foram postos à prova com relação às suas concepções prévias e às novas concepções formadas a partir das informações recebidas durante as aulas.

- Revisão construtiva - É o momento em que o aluno sedimenta os seus conhecimentos. O professor pode realizar várias atividades de reforço, como entrevistas, debates, palestras. Ao final dessa fase é aconselhável realizar-se um pós-teste, nos mesmos moldes do pré-teste, para verificar se houve mudanças conceituais (BASTOS, 1992).

A suposição fundamental de que as concepções dos alunos de MQ pudessem ser mudadas pelo Ciclo da Experiência Kellyana foi a base deste trabalho. Assim, a revisão construtiva consistiu de dois momentos. O primeiro foi a realização do pós-teste, que ocorreu no dia seguinte à aplicação do questionário da confirmação/refutação (2ª aula), que coletou as novas concepções dos alunos após terem vivenciado todo o Ciclo da Experiência. Suas respostas serão analisadas na seção 4.4. Por último, tendo em vista as ambigüidades permitidas por questionários abertos, resolvemos elaborar algumas questões acerca da difração e interferência de elétrons e aplicá-las durante entrevistas dirigidas, com intuito de resgatar outras informações que talvez tenham escapado ou não foram detectadas pelo pós-teste. Sua análise se encontra na seção 4.6.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os dados obtidos a partir dos instrumentos de nossa pesquisa, desde o pré-teste até a entrevista.

4.1 Análise dos dados do pré-teste

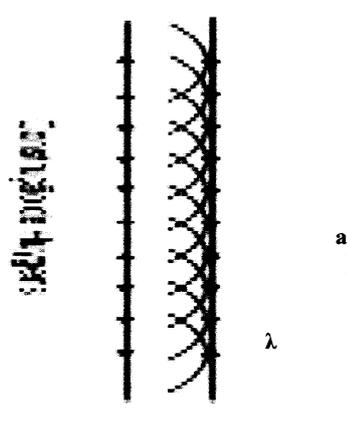
No pré-teste, foram utilizadas cinco questões abertas ou de respostas discursivas, na esperança dos alunos revelarem traços de suas concepções sobre o tema principal, que é a difração de elétrons. Em seguida iremos analisar as respostas dadas a cada uma das questões formuladas, fazendo uma comparação entre a resposta cientificamente aceita e as respostas dadas pelos alunos de FM e MQ. Nas considerações finais, faremos um confronto entre os nossos resultados e os encontrados na revisão de literatura.

Para identificar os alunos usamos símbolos do tipo A I e B I, em que o número se refere ao aluno, enquanto que as letras referem-se às disciplinas de Física Moderna e de Mecânica Quântica, respectivamente. As respostas dadas pelos alunos foram categorizadas e são apresentadas nas tabelas a seguir.

Questão 1

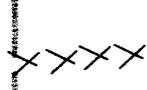
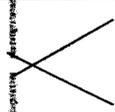
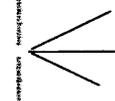
Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira, na qual foi feita uma pequena fenda de abertura a :

Figura 01



- a) Desenhe, após a fenda, a representação dessas ondas, usando a construção de Huygen.s.

TABELA 1:
Respostas dadas à questão 1.a:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
		B4, B6, B7 e B10		40
	A2 e A3		40	
	A5		20	
	A1	B5	20	10
		B8		10
	A4		20	
Não respondeu		B1, B2, B3 e B9		40
Total	05	10	100	100

Esperávamos que os alunos tivessem uma compreensão do modelo de Huygens, suficiente para utilizá-lo na explicação do processo de formação de uma onda, que conhecessem o fenômeno da difração e a influência da abertura da fenda sobre esse fenômeno. Entretanto, o que vimos foram alunos confusos entre o uso da óptica Geométrica e óptica Física. Esse resultado, entretanto, foi compatível com o fato dos alunos não terem

estudado óptica Física em nenhuma disciplina no Curso de Licenciatura em Física da UEPB.

Quase metade dos alunos de Física Moderna (40%) apresentou informações de que a luz se propaga em linha reta (paralela, A4 ou cruzando-se, A5), após o orifício, de forma semelhante à proposta por Newton, levando em consideração a abertura da fenda, mas sem ter noção do fenômeno da difração. Esse tipo de resultado aproxima-se do cotidiano dos alunos, que observam diversos fenômenos nos quais a luz se propaga em linha reta ao atravessar aberturas cujas dimensões são muito superiores à faixa de frequência da luz visível, conforme os resultados obtidos por Fletcher et al. (1998). Os alunos A2 e A3 apresentaram desenhos que sugerem uma propagação da parte da frente de onda que se encontra diante da fenda. Essa compreensão é explicitada por A2, na resposta ao item 1.b, mas não é explicitada por A3, que se limita a escrever a palavra "difração" nesse item. Apenas o aluno AI desenhou o fenômeno da difração. Sua compreensão sobre o fenômeno será analisada mais adiante.

Dentre os alunos de Mecânica Quântica, 50% fizeram um desenho que se assemelha ao da difração após a fenda. Um aluno (B8) apresentou um desenho com raios divergentes a partir da abertura e os 40% restantes deixaram a questão em branco. É interessante observar que os resultados dessa turma foram diferentes dos resultados da turma de FM, especialmente com relação à associação com as questões do cotidiano, que nesse último caso ocorreu com apenas um aluno, enquanto os quatro alunos restantes deixaram a questão em branco, o que não ocorreu com nenhum aluno da turma de FM. A explicação para esses resultados pode ser devida ao fato desses alunos, por estarem no último período do curso, adotarem posturas mais críticas, afastando-se dos seus conhecimentos prévios e, devido à ausência de conhecimentos científicos, terem optado por não responder à questão.

Questão 1.b

Que tipo de fenômeno ocorreu após a passagem do feixe de luz através da fenda?

TABELA 2:
Respostas dadas à questão 1.b:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Difração	A3 e A4	BI, B2, B6, B7 e BIO	40	50
Superposição de ondas	AI		20	
Refração	A5			
Refiração e propagação retilínea	A2			
Reflexão		B3		10
Outras respostas		B4 e B5		20
Não respondeu		B8 e B9		20
Total	05	10	100	100

Nesse item, temos as respostas dos alunos A3 e A4, que surpreenderam pelo fato de responderem com o nome do fenômeno, apesar de no item anterior terem feito um desenho totalmente incompatível com essa resposta.

O aluno AI, que no item anterior fez um desenho bem detalhado da difração, não cita esse fenômeno, mas se refere à superposição de ondas, ou interferência, que também ocorre após a fenda.

O aluno A2 apresentou a seguinte resposta: "Ocorreu uma refração de parte do feixe de luz, outra atravessando a fenda, em sua forma ondulatória propagando-se em linha reta, isto é, retilínea". Tal resposta sugere uma divisão do feixe em duas partes. A primeira, que sofre uma "refração", e a segunda, que atravessa a fenda e segue em linha reta, conforme apresentado no desenho do item 1.a. O aluno não fornece elementos suficientes para se compreender o que ele quer dizer com o termo "refração". Talvez estivesse querendo dizer "reflexão", sugerindo um desvio na parte da frente de onda que se choca com o anteparo.

O aluno A5 limitou-se a responder este item com a palavra "refração", sem nos dar informações suficientes para a sua análise.

Em relação aos alunos de MQ, temos que 50% deles responderam corretamente sobre o fenômeno existente. Entretanto, apenas três deles (136, B7 e B 10) continuaram consistentes com suas respostas ao item anterior (1.a) e ao fenômeno correspondente (1.b), ou seja, responderam que se tratava de uma difração. Os alunos B1 e B2, que não responderam ao item anterior, acertaram em responder que o fenômeno era a difração, mas não apresentaram nenhum argumento defendendo essa posição.

O aluno B3, que não respondeu ao item La, limitou-se a responder "reflexão", sem possibilitar qualquer análise dessa resposta.

O aluno B4, que no item La fez um desenho compatível com a difração, não citou esse fenômeno, tendo apresentado a seguinte resposta: "Uma filtragem do sinal, onde só apresentou ondas que incidiam na fenda". Esse tipo de resposta não nos permite compreender a concepção do aluno. Porém, esse aluno deu uma resposta por escrito ao item La, na qual ele afirma que "se $a > \lambda$, o feixe de luz incidente ultrapassará a barreira, com parcelas de ondas, caso $a < \lambda$ não terá passagem". A partir dessa resposta, podemos concluir que o aluno compreende o fenômeno como uma simples restrição imposta pela largura da fenda, que permite ou não a passagem de parte da frente de onda, que incide na abertura.

O aluno B5, que no item La fez um desenho bem detalhado do encurvamento das ondas após a fenda, apesar de não citar a difração, definiu o fenômeno da seguinte maneira: "É um fenômeno ondulatório, em que a onda se propaga como se fosse uma fonte de luz puntiforme". Essa resposta indica que, apesar de não conhecer o nome, ou ter esquecido, o aluno recorda do princípio de Huygens, que considera que cada ponto da frente de onda se comporta como uma fonte puntiforme.

Questão 1.c

Qual a influência da largura (a) da fenda e o comprimento de onda da luz incidente (k) sobre o fenômeno que ocorre após a passagem do feixe de luz através da fenda?

TABELA 3:
Respostas dadas à questão 1.c:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Não há influência do 1	A2		20	
Se $\lambda > a$, haverá Difração		B6 e B10		20
Se $a \leq \lambda$, não haverá figuras de interferência	A4		20	
Se $a < \lambda$, não haverá passagem da onda		B4		10
Se $a > \lambda$, a luz se comporta como Partícula	A1		20	
Quanto maior a e λ , maior o número de ondas que atravessam		B3		10
Se a aumenta, temos uma fonte extensa		B5		10
Quanto maior a abertura, maior o fenômeno	A5		20	
Resposta dúbia	A3		20	
Não respondeu		B 1, B2, B7, B8 e B9		50
Total	05	10	100	100

Certamente, essa é uma relação pouco explorada dentro da óptica ondulatória e talvez por isso dê margem a várias interpretações.

O aluno A2 foi o único a afirmar que não havia influência do comprimento de onda sobre o fenômeno, mas não analisou a relação entre a largura da fenda e o fenômeno. Esse aluno, por outro lado, associa o comprimento de onda à forma ondulatória ou corpuscular da luz. Dessa maneira, a largura da fenda parece ser considerada apenas como um fator limitante da porção da onda a passar pelo anteparo e continuar propagando-se em linha reta.

A resposta dada pelo aluno A4 é inconsistente com as respostas dadas aos itens 1.a e 1.b, nas quais ele apresentou uma concepção de propagação retilínea, seguida pela citação da difração como fenômeno que ocorria após a passagem do feixe de luz pela fenda. No presente item ele se refere a "figuras de interferência", sem dar maiores explicações. Assim, verificamos que o aluno não possui uma concepção organizada sobre o fenômeno da difração.

O aluno A1 associa a relação entre a largura da fenda e o comprimento de onda da luz com seu comportamento corpuscular ou ondulatório, apresentando uma concepção com esse aspecto semelhante ao do aluno A2. Por outro lado, em outros aspectos, A1 se diferencia de A2, por considerar o encurvamento do feixe ao passar por uma fenda estreita.

O aluno A5, que afirmou: "quanto maior for a abertura, maior será o fenômeno", deu respostas aos três itens da questão 1, que nos levam a considerar que ele não possui uma concepção organizada sobre a difração, uma vez que ele se refere no item 1.b à refração e no item La indica uma propagação retilínea da luz, divergindo a partir de dois pontos da frente de onda incidente no anteparo.

A resposta dada por A3, "se a largura da fenda for menor que o comprimento da onda a passagem", deixa dúvidas sobre o que ele realmente quis dizer, pois há duas formas de interpretá-la. A primeira considera que o aluno quis escrever "há passagem", indicando que nessa situação o feixe atravessa a fenda. A segunda sugere que o aluno não terminou a frase, deixando-a sem conclusão. Portanto, não conseguimos interpretar sua resposta, especialmente ao considerar que nos itens anteriores ele cita a difração, mas faz um desenho inconsistente com esse fenômeno.

Dos três alunos de MQ que deram respostas compatíveis com o conceito científico de difração nos itens La e 1.b (B6, B7 e B 10), apenas B6 e B10 deram respostas corretas ao item 1.c, relacionando a abertura da fenda com o comprimento de onda da luz incidente, como condição para que o fenômeno ocorra.

O aluno B4, nesse último item, confirma a sua idéia de que a relação entre a largura da fenda e o comprimento de onda é decisiva para permitir a passagem ou não da onda, sem entrar em detalhes sobre o que ocorre com a propagação após o anteparo. Portanto, é preciso, na concepção desse aluno, que a largura da fenda seja maior que o comprimento de onda para que haja propagação.

O aluno B3 considera que a largura da fenda e o comprimento de onda se relacionam com o número de ondas que atravessam o anteparo, de uma maneira tal que, juntando essa resposta à dada no item 1.b, na qual se limitou a escrever a palavra "reflexão", não nos deixou em condições de chegar a nenhuma conclusão com relação a sua concepção de difração.

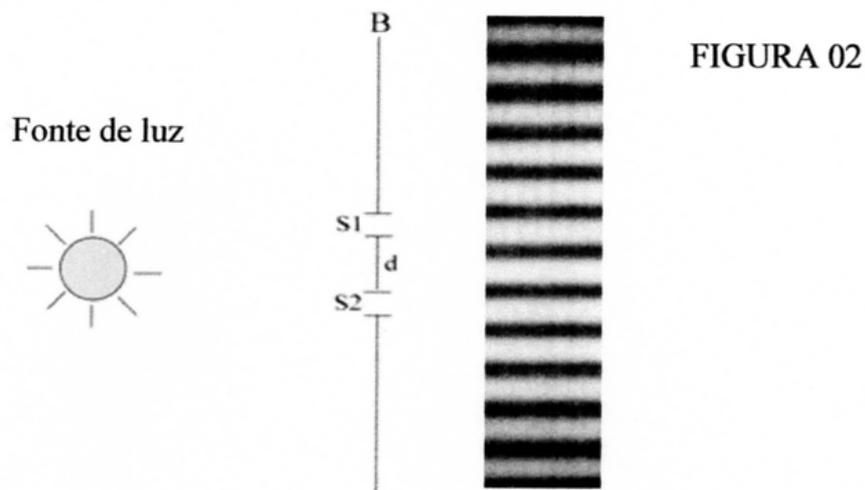
No caso do aluno B5, sua resposta ao item 1.e começa relacionando a largura da fenda à existência de uma fonte extensa (o que é compatível com a visão científica) e termina de forma confusa, afirmando que isso "... faz com que as "ondas" ou "frente" de ondas fique bem maior". Dessa maneira, considerando essa resposta juntamente com as apresentadas nos itens La e 1.b, podemos concluir esse aluno possui as idéias básicas do conceito científico de difração, mas ainda se confunde com detalhes desse conceito.

Os alunos B1, B2, B7, B8 e B9, que não responderam esse último item, podem ser subdivididos em quatro grupos. O primeiro, formado pelo aluno B9, que não respondeu a nenhum item da questão 1, impossibilitando qualquer análise sobre sua concepção de difração. O segundo formado pelos alunos B1 e B2, que responderam apenas ao item 1.b, utilizando a palavra "difração", levando-nos a supor que eles tenham visto uma situação semelhante numa ocasião anterior e ainda lembram que ela estava ligada à ocorrência desse fenômeno.

O terceiro, formado pelo aluno B8, deixou em branco os itens 1.b e 1.c, e desenhou uma propagação retilínea e divergente a partir da fenda, levando-nos a supor que sua concepção para essa situação inclui elementos do senso comum, para o qual a luz sempre se propaga em linha reta. Finalmente, o quarto grupo é formado pelo aluno B7, que respondeu aos itens La e 1.b de acordo com o conceito científico de difração, mas deixou em branco o item 1.c. Esse resultado parece indicar que o aluno teve contato anterior com o conceito de difração, mas não recorda dos detalhes sobre a relação entre a largura da fenda e o comprimento de onda da luz incidente.

Questão 2

Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira com duas fendas de mesma abertura (s_1 s_2), com uma distância d entre si (si 5 Após a barreira existe um anteparo fixo.



Questão 2.a

Após a passagem da luz através das fendas ocorrem dois fenômenos ópticos. Quais são eles?

TABELA 4:
Respostas dadas à questão 2.a:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Difração e refração	A2, A3 e A5		60	
Difração e interferência		B5, B10		20
Interferência construtiva e destrutiva	A4	B9	20	10
Difração e difração da fenda dupla		B1		10
Reflexão e absorção		B3		10
Difração		B4		10
Difração e reflexão		B6		10
Reflexão e difusão		B7		10
Não respondeu	A1	B2, B8	20	20
Total	05	10	100	100

Nesse item (2.a), enfocamos os dois fenômenos da óptica física simultaneamente: a difração e a interferência luminosa. A diferença desse item para o item 1.b resulta no fato de termos duas fendas e o padrão de interferência mostrado no anteparo, como um reforço às respostas dos alunos. Através da análise das respostas dadas pelos alunos de FM, a esse item, percebemos que nenhum apresenta a resposta desejada.

Os alunos A2, A3 e A5 referem-se à difração, mas não falam da interferência. Ao invés disso, incluem a refração como segundo fenômeno óptico, apesar de não haver mudança de meio. Os alunos A2 e A5 já haviam se referido à refração na questão 1.b, de modo que não se compreende porque eles incluíram a difração neste caso. O Aluno A3 fala em difração no item 1.b e, portanto, não se compreende de onde ele foi buscar o fenômeno da refração. De um modo geral, as respostas desses três alunos não nos permitem chegar a nenhuma conclusão sobre suas compreensões a respeito tanto da difração quanto da refração.

Nesse item o aluno A4 volta a falar de interferência (conforme já havia falado no item 1.c), mas não cita a difração, o que nos surpreende, pois já havia considerado que a luz sofre difração ao passar por uma fenda, chegando a fazer um desenho referente à propagação da luz, após a fenda, no item La, no qual indicou uma propagação retilínea da luz, de forma contraditória à esperada numa difração. Desse modo, esse aluno parece reconhecer um padrão de interferência, mas não sabe o que é uma difração.

O aluno A1 não respondeu a esse item, para nossa surpresa, pois nos itens 1.a e 1.b, ele fez um desenho do fenômeno da difração e falou de superposição de ondas, respectivamente. Talvez esse aluno não conheça os nomes dos fenômenos.

Analisando as categorias apresentadas pelos alunos de MQ, notamos que os alunos B5 e B10 mantêm-se coerentes às respostas dadas aos itens anteriores, dando como resposta os fenômenos da difração e interferência, conforme esperado. Esses dois alunos parecem conhecer os nomes e os fenômenos, apresentando até aqui respostas totalmente corretas.

O aluno B9, que não respondeu a nenhum dos itens anteriores, escreveu que se trata de interferência construtiva e destrutiva, sem nenhum vínculo com os itens da questão anterior, como pode ser comprovado pela falta de referência à difração.

O aluno B1, que não respondeu aos itens 1.a e 1.e, volta a falar de difração e difração de fenda dupla, sem, contudo, ter apresentado nenhum elemento nesses itens, que poderiam justificar tal resposta. Desse modo, parece que ele simplesmente recorda de nomes que escutou em aulas anteriores.

Pelas respostas dadas aos itens 1.b e 1.c, bem como as respostas ao item 2.a, verificamos que o aluno B3 pensa apenas em termos de reflexão da luz, para a parte que incide no anteparo, e em termos de absorção da luz, para a parte que atravessa as fendas. Tal forma de pensar não considera a natureza ondulatória da luz.

O aluno B4 apresenta apenas o fenômeno da difração como resposta à questão 2.a, deixando interrogações como resposta ao segundo fenômeno óptico que está ocorrendo nessa situação. Nesse caso, podemos supor que ele associa a simples passagem da frente

de onda pela fenda como sendo a difração. Esse aluno nada relata sobre a interferência, demonstrando não compreender os detalhes do fenômeno da difração.

De modo semelhante ao aluno B4, o aluno B6 também não se refere à interferência como fenômeno associado à difração. Por outro lado, quando trata da difração, ele parece compreender o encurvamento da frente de onda e a influência da largura da fenda nesse encurvamento, conforme demonstrado nas respostas à questão 1.

Apesar de ter dado respostas consistentes aos itens 1.a e 1.b, o aluno B7 refere-se à reflexão e difusão como sendo os fenômenos ópticos que ocorrem na questão 2.a. Essa resposta parece indicar que, apesar do aluno estar analisando uma situação que envolvia duas fendas, ele não estabeleceu nenhuma relação com a figura 1, que envolvia uma fenda, e com o fenômeno da difração e da interferência.

Os alunos B2 e B8 não responderam a esse item, não nos dando condições para analisá-los mais profundamente, apesar de B2 ter respondido corretamente sobre o fenômeno da difração no item 1.b.

Questão 2.b A que correspondem às regiões claras e escuras no anteparo?

TABELA 5:
Respostas dadas à questão 2.b:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Escuras - ondas se anulam Claras - ondas se somam	A 1	B7	20	10
Escuras- bloqueio da luz Claras - passagem da luz	A3		20	
Claras - interferência destrutiva e Escuras - interferência construtiva	A4		20	
Claras - luz refletida Escuras - luz absorvida		B3		10
Claras- incidência de elétrons Escuras- ausência de elétrons		B4		10
Escuras - vale Claras - picos ou cristas		B5		10
Regiões de maior e menor incidência de fótons respectivamente		B9		10
Interferência		B10		10
Outras respostas	A2, A5	B1, B6 e B8	40	30
Não respondeu		B2		10
Total	OS 05	10	100	100

Analisando a tabela de um modo geral, podemos observar que as respostas se distribuem entre diversas categorias, havendo um maior número de respostas sem sentido. Dentre as categorias, encontramos quatro ligadas à idéia da interferência, duas ligadas à chegada ou

não da luz na tela, uma ligada à chegada ou não de elétrons e uma ligada à reflexão ou absorção da luz.

Dentre os alunos de FM, A1 e A4 deram respostas ligadas à idéia da interferência, sendo que, enquanto o aluno A1 deu uma resposta correta, o aluno A4 trocou as informações com relação à soma das ondas - claras (interferência construtiva) e a subtração das ondas -escuras (interferência destrutiva). Pelas respostas anteriores do aluno A1, essa resposta é consistente, dando a entender que, apesar do aluno até esse ponto do pré-teste não ter utilizado os termos interferência e difração, ele possui uma certa compreensão desses fenômenos. No caso do aluno A4, porém, as respostas anteriores foram muito misturadas, não nos permitindo concluir se ele simplesmente confundiu o que escreveu, ou se realmente pensa dessa maneira.

O aluno A3, ao invés de pensar em termos de interferência, possui um modelo ligado às idéias de passagem ou bloqueio da luz.

O aluno A5 dá uma resposta um pouco genérica, tomando como parâmetro a incidência da luz. Como esse aluno, nas respostas anteriores, apresentou idéias muito soltas e misturadas, optamos por incluí-lo nessa categoria. Já o aluno A2, cujas respostas anteriores também foram misturadas, apresentou neste item a seguinte resposta: "as regiões claras correspondem ao espectro de natureza da luz, e as regiões escuras ao comprimento do espectro de onda". Percebemos, neste caso, que o aluno deve ter visto alguma figura com o espectro de uma fonte luminosa que possibilitou essa confusão com a figura de interferência.

Na turma de MQ, encontramos os alunos B7, B5 e B 10, cujas idéias estão de alguma forma relacionadas com a interferência. O aluno B7, apesar de ter dado uma resposta na qual se refere explicitamente ao fenômeno da interferência, não cita o nome do mesmo e, na resposta anterior (item 2.a) não identificou corretamente os dois fenômenos ópticos. Desse modo, ele parece não associar a difração à interferência, além de não lembrar do nome desse último fenômeno. O aluno B5, que identificou corretamente os dois fenômenos ópticos, parece associar a interferência apenas ao caso destrutivo, que ele liga à existência de vales nas ondas, enquanto relaciona as cristas às regiões claras da

figura. O aluno BIO também identificou corretamente os dois fenômenos ópticos e limitou-se a considerar as regiões claras e escuras de um modo geral, ligando-as ao fenômeno da interferência, sem dar maiores detalhes.

A resposta do aluno B3, apesar de não estar correta, é coerente com a resposta dada ao item 2.a, e baseia-se num modelo de reflexão ou absorção da luz. Dessa forma, as faixas claras correspondem aos trechos do anteparo onde a luz é refletida e as escuras àquelas em que a luz é absorvida. Observamos assim que esse aluno parece desconhecer os conceitos de difração e interferência.

O aluno B4, no item 2.a, identificou apenas o fenômeno da difração. Neste item ele associa as regiões claras e escuras com aquelas em que chegam ou não elétrons. Assim, verificamos que o aluno não possui a idéia de interferência, além de confundir fótons com elétrons, consistente com os resultados obtidos por Ambrose et al (1999).

O aluno B9, que conseguiu identificar um dos dois fenômenos ópticos do item 2.a, respondeu que as regiões claras e escuras estão ligadas à maior ou menor incidência de fótons. Nesse caso, observamos que, apesar de se referir à interferência, que é um fenômeno ondulatório, o aluno pensa sobre a luz em termos de partículas (fótons). Essa posição é reforçada pelo fato dele não ter respondido à questão 1, que trata da difração.

Os alunos B1, B6 e B8, que deram outras respostas, variaram desde a apresentação de uma idéia solta, no caso de B1, cuja resposta foi "polarização", passando por B6, cuja resposta foi "a parte clara é a batida dos elétrons no anteparo", na qual utiliza a idéia de partículas para explicar um fenômeno ondulatório, até o aluno B8, que respondeu "corresponde ao local onde se encontra a maior concentração de fótons maior energia", em que, apesar de se referir a fótons, explica de uma maneira truncada um fenômeno ondulatório. Assim, deixando de lado B1, que deu uma resposta completamente sem sentido, os outros dois alunos apresentam concepções que misturam aspectos de ondas com partículas. Além disso, fótons e elétrons são associados à luz como se fossem as mesmas partículas. O aluno B2 deixou em branco este item, assim como o item anterior desta questão, o que nos deixa sem condições de fazer qualquer comentário.

Questão 2.c

Se um feixe de partículas em movimento (metralhadora de partículas) fosse interceptado pelo obstáculo da figura 3 abaixo, o que veríamos no anteparo? Justifique. Qual a relação com o padrão da figura 2 ?

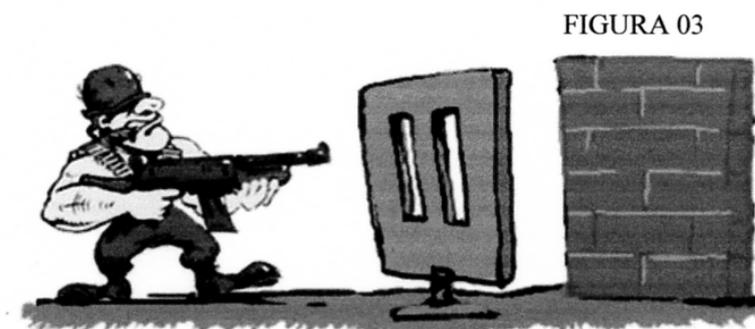


TABELA 6:
Respostas dadas à questão 2 (c).

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Veremos a figura 2 na vertical.	A1	B4, B6, B7, B9	20	40
	A2, A3, A4	B5	60	10
Veríamos apenas um quadrado ou retângulo	A5	B3	20	10
Difração de fenda dupla		B1		10
São fenômenos diferentes: fig. 2 são ondas e fig. 3 são partículas		B10		10
Não respondeu		B2, B8		20
Total	05	10	100	100

De um modo geral, a maioria dos alunos de ambas as disciplinas divide-se em dois grupos, que possuem concepções ondulatórias e corpusculares. Analisando cada urna das turmas em separado, podemos perceber que, no caso da turma de FM, apenas o aluno A1 possui uma concepção ondulatória associada a esse fenômeno. Enquanto isso, os alunos A2, A3 e A4 possuem concepções corpusculares, nas quais as partículas atravessam a fenda, movendo-se perpendicularmente à mesma e sem sofrer nenhum tipo de espalhamento, gerando uma figura idêntica à da própria fenda. O aluno A5, por outro

lado, também possui uma concepção corpuscular, porém considera o espalhamento das partículas ao atravessar a fenda, o que pode gerar uma região única no anteparo, que foi atingida por essas partículas.

A turma de MQ possui quatro alunos (B4, B6, B7 e B9) que fazem uma analogia entre o que ocorrerá na figura 3 com o que ocorreu na figura 2. Para esses alunos, tanto a luz quanto as partículas, ao atravessarem as duas fendas, sofrem o mesmo tipo de fenômeno. A questão maior que se coloca neste momento é sobre a identidade desse fenômeno. Se olharmos com cuidado as respostas anteriores desses quatro alunos, veremos que eles não têm clareza sobre a origem dessas faixas claras e escuras. Assim, eles simplesmente aceitam como verdadeira a informação dada na figura 2 e consideram que ela se repete na figura 3.

O aluno B5, que respondeu corretamente aos itens anteriores do questionário, considera o comportamento corpuscular dessas partículas e sua conseqüente concentração em duas áreas do anteparo. Já o aluno B3, que não respondeu corretamente às questões anteriores, faz uma analogia entre a situação da figura 3 e a propagação retilínea da luz, sem levar em conta nenhum aspecto ondulatório.

O aluno B 1 continua enfatizando a difração da fenda dupla, como fez no item 2.a, relacionando-a nesse item com as partículas ali existentes. Analisando os itens anteriores, vemos que o mesmo não possui uma estrutura conceitual consistente para interpretar a natureza e comportamento da luz. Ao contrário do aluno BI, o aluno BIO se manteve coerente ao longo do questionário, identificando os fenômenos ondulatórios apresentados anteriormente e ressaltando o aspecto corpuscular deste último fenômeno. Apesar disso, o aluno não apresentou objetivamente o que seria visto no anteparo. No caso desse último aluno, apesar da presença da fenda dupla nas figuras 2 e 3, o fato de envolver partículas e ondas era suficiente para garantir resultados diferentes após a passagem desses feixes pela fenda. Tal posicionamento é completamente diferente daquele observado nos alunos B4, B6, B7 e B9, que deram suas respostas considerando como aspecto principal a presença da fenda dupla.

O aluno B2 deixou em branco este item, assim como o item anterior desta questão, o que nos deixa sem condições de fazer qualquer comentário. O aluno B8 segue a mesmo estilo, não respondendo a este item.

Questão 3:

Nessas duas situações (figuras 1 e 2), a luz se comporta como partícula (como Newton pensava) ou urna onda (como Huygens e Young afirmavam)? Justifique.

Figura 01

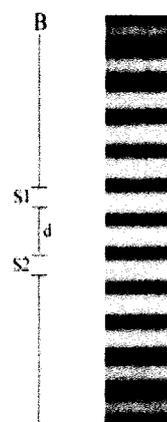
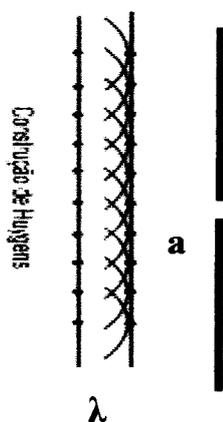


figura02

TABELA 7:

Respostas dadas à questão 3:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Como onda	A1, A2	B4, B6, B7, B9 e B10	40	50
Como partícula	A3, A4	B2, B8	40	20
A luz ora comporta-se como onda e ora como partícula	A5	B1, B3, B5	20	30
Total	05	10	100	100

Nesta questão esperávamos que os alunos de FM e MQ, com um pouco de conhecimento de óptica física adquirido no ensino médio, respondessem que se tratava de um fenômeno ondulatório, contrariando o modelo corpuscular de Newton. No entanto, como vimos nas respostas dadas por eles, as dúvidas persistem.

Percebe-se, através das respostas dos alunos de FM, que 40% deles (A1 e A2) acreditam que nas figuras 1 e 2 a luz se comporta como onda (pois há propagação retilínea e interferência), 40% (M e M) como partícula (em função da largura da fenda ser grande) e 20% (M) de forma híbrida, ou seja, como onda e partícula. As razões apresentadas por esses alunos não são convincentes, visto que não possuem todos os elementos requeridos para a análise das mesmas. Assim, o aluno A2 baseia-se em características das partículas ("propaga-se de modo contínuo e retilíneo...") para justificar o comportamento de onda. Por outro lado, o aluno A5 limita-se a dizer como a luz se comporta, sem apresentar nenhuma justificativa.

Para os alunos de MQ, temos 50% (B4, B6, B7, B9 e B 10) afirmando que é um fenômeno ondulatório, sendo que desses, (B6 e B7) não apresentam uma justificativa para as suas afirmações. Um deles (B9) apresenta o fenômeno da interferência e outro (B10) o fenômeno da difração, como justificativas. Além desses, o aluno B4 não apresenta uma justificativa compreensível ("Como Huygens, pois se as partículas passam pelo obstáculo como Newton pensava, não ocorreriam o mesmo n° de linhas").

Temos 30% dos alunos (B1, B3, B5) recorrendo ao dualismo onda-partícula, que é comumente encontrado nos livros-texto e bastante utilizado por professores e estudantes. Entre esses, o aluno B5 limita-se a afirmar o comportamento dual da luz, sem identificar em que situação, nem apresentar uma justificativa. Enquanto isso, o aluno B 1 argumenta apoiando-se na difração, para explicar o comportamento ondulatório da luz e na polarização para explicar o comportamento de partícula. É interessante ressaltar que a polarização é uma característica das ondas e não das partículas. Já o aluno B3 analisa a figura 1 como um fenômeno ondulatório, simplesmente afirmando que: "... a luz se comporta como uma onda que continua a se propagar..." e considera que na figura 2 ela se comporta como partícula "... que é absorvida pelo anteparo". Vê-se, então, que o aluno B3 não apresenta justificativas aceitáveis para as suas respostas.

Os 20% restantes (B2 e B8) relacionam as duas situações ao comportamento da luz como partícula, sem apresentar nenhuma justificativa para tal.

Questão 4:

No final do século XIX, Hertz testou experimentalmente a natureza da luz, deduzido por Maxwell, como onda eletromagnética. No entanto, em 1905, Einstein explicou teoricamente o efeito fotoelétrico, constatado no próprio experimento por Hertz e posteriormente por Lenard, concluindo que a luz é formada por partículas, que ele chamou de fótons. Diante deste relato histórico, o que você diria sobre a natureza da luz? Justifique.

TABELA 8:
Respostas dadas à questão 4:

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Em alguns casos a luz se comporta como onda e em outros como partícula	AI, A2, A4	131,132,133,136	60	40
A natureza da luz é onda e partícula.	A3	B4, B7, B8, B 10	20	40
Como partícula	A5	B5	20	10
Quando observada à distância é uma onda; de perto é uma partícula		B9		10
total	05	10	100	100

A experiência do efeito fotoelétrico é um assunto bastante discutido ao longo da disciplina de FM, ou seja, é um dos assuntos "porta de entrada" da FM e MQ. Por isso, espera-se que os alunos de FM e MQ possuam uma concepção mais aceitável da física ondulatória para a luz, associada aos fenômenos da difração e interferência, e corpuscular na experiência do efeito fotoelétrico. No entanto, não foi isso que vimos em relação às questões anteriores (questões 1 a 3). Por outro lado, sabemos que a palavra "dualismo" ou dual está fortemente ligada à concepção dos alunos de FM e MQ, uma

vez que ela é bastante utilizada em sala de aula por professores; por isso esperávamos, também, que nesta questão, a maioria desses alunos respondesse que a luz apresenta um comportamento dual.

Em MQ os alunos seguem o mesmo estilo dos alunos de FM, ou seja, sabemos que a palavra dualismo está muito associada às teorias quânticas e assim achávamos que a maioria responderia essa proposição, ligando-a ao dualismo. Entretanto, apenas 60% dos alunos de FM (A1, A2 e A4) e 40% dos alunos de MQ (131, B2, B3, 136) responderam que se tratava de um fenômeno dual, nos termos utilizados pela Teoria de Bolir, ou seja, que a natureza apresentada pela luz dependerá da experiência a ser realizada. Essa é a interpretação mais utilizada nas salas de aula de FM e MQ.

Para o aluno A3 e os alunos B4, B7, B8 e BIO, 20% e 40% respectivamente, a luz apresenta comportamento de onda e partícula, no mesmo experimento. Essa concepção se alinha com a perspectiva proposta por De Broglie, que atribui aspecto ondulatório e corpuscular, ao mesmo tempo, ao fóton de luz, ou seja, a luz pode ser espalhada e pontual, divisível e indivisível, simultaneamente, pois há uma associação entre uma partícula (fóton) e uma onda-piloto, diferentemente do princípio da complementaridade de Bolir. Vemos aqui uma outra interpretação dualista. Isso nos mostra que, apesar de os professores de ambas as disciplinas 17M e MQ declararem que enfatizam o modelo de dualidade proposto por Bolir, ainda encontramos alunos com a visão dualista-realista de De Broglie.

Os alunos A5 e B5 são partidários da natureza da luz como partícula em todas as situações descritas nesta questão. Entretanto, sabemos que a difração e a interferência não são fenômenos corpusculares e que a luz só se comporta como partícula na experiência do efeito fotoelétrico. Tal resultado pode ser decorrente desses alunos não terem estudado óptica física e óptica geométrica nas primeiras séries da licenciatura.

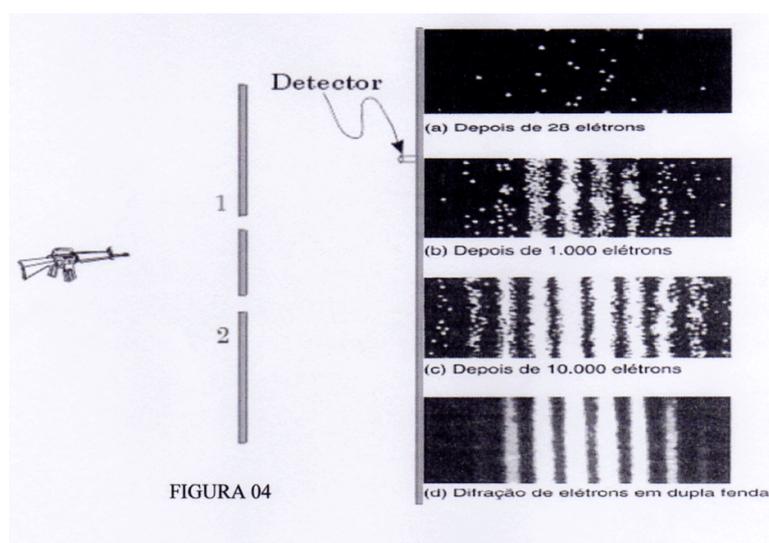
A resposta dada pelo aluno B9 indica que ele acredita na natureza dual da luz e que, além disso, pode ter escutado a perspectiva de Bolir, que se refere a uma propagação como onda e detecção como partícula, tendo feito uma adaptação, de modo a relacionar

a detecção com uma "observação de perto" e a propagação com uma "observação à distância".

Diante das dificuldades detectadas entre os alunos de FM e MQ, talvez fosse relevante considerar a posição de Fiscliler et al (1992), que sugere que seria melhor abandonar a terminologia onda-partícula e afirmar que a matéria e a luz consistem de objetos quânticos de comportamentos totalmente diferentes de partículas ou ondas clássicas. Enquanto os professores continuarem a expressar a idéia de que a luz revela sua natureza de partícula em alguns experimentos, os estudantes apegar-se-ão ao conceito de "fótons", o qual é muito similar ao conceito clássico de partícula. Essa discussão sobre as interpretações não termina aqui e não sabemos até que ponto abandono da terminologia tradicional ondapartícula, poderia contribuir para o avanço do corpo de conhecimentos da MQ, pois se a matéria e a luz são objetos que se comportam de maneira totalmente diferente, de que maneira inovadora deveriam eles se comportar? Qual seria a vantagem dessa abordagem?

Questão 5:

Um feixe de elétrons é disparado contra uma barreira, conforme a figura 04, passando por duas fendas de mesma abertura e formando os padrões mostrados na figura abaixo, sobre uma tela cintiladora, em que eles são detectados.



Questão 5.a

Que padrão você espera obter com a passagem de apenas um elétron pelas duas fendas?

TABELA 9:
Respostas dadas à questão 5.a:

CATEGORIAS	AUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Observaremos um ponto	A3, A4, A5	B3, B4	60	20
Padrão D		B6, B9		20
Apresenta caráter ondulatório	AI		20	
Padrão da fig. A		B 1		10
Um ponto ou um padrão de difração.		B5		10
Outras respostas		B8		10
Não respondeu	A2	B2, B7, B10	20	30
Total	05	10	100	100

O experimento da fenda dupla para elétrons é a questão mais importante desta pesquisa, uma vez que se organiza em torno do nosso objeto de pesquisa (difração de elétrons). Nesse caso, o objeto quântico é o elétron ao invés do fóton, como nas questões anteriores, possuindo as mesmas características. Apesar do experimento parecer incompreensível para alguns pesquisadores, segundo Bastos Filho et al (1993), o experimento da dupla fenda para o elétron é compatível ao realizado para a luz, sendo, portanto, observados os fenômenos da interferência e difração, dando-lhe um caráter ondulatório.

Algumas dificuldades específicas identificadas nos alunos de MQ parecem ser mais graves do que nos alunos de FM, mostrando-nos que os mesmos não possuem uma estrutura conceitual consistente para interpretar a natureza e comportamento dos elétrons nesse experimento, ou seja, eles cometem os mesmos erros conceituais, que cometiam com a luz, quando agora utilizam elétrons no experimento.

Nesta questão temos uma figura que representa um feixe de elétrons que é disparado contra uma barreira com duas fendas, formando um padrão de interferência numa tela

cintiladora. No item (a) esperávamos que os alunos respondessem que haveria apenas uma cintilação pontual na tela ou talvez que eles afirmassem que haveria uma cintilação na tela, que estivesse localizada em qualquer posição permitida pelo padrão de interferência que se obtém quando se utiliza um grande número de elétrons, como mostrado no padrão D da figura do pré-teste.

Tivemos 60% (A3, A4, A5) em FM respondendo de forma correta, como A4, que respondeu: "Iremos observar apenas um ponto cintilante" ou como A3, que disse: "de um elétron" e compreendemos que ele se referia a um ponto cintilante. Entretanto, a resposta de A5, "0 elétron ficaria sozinho não seguindo nenhum padrão", apesar de poder ser compreendida como correta, se o aluno quiser dizer que aparece um ponto na tela, leva-nos a crer que este aluno talvez não saiba que o elétron possui probabilidades diferentes de cair em regiões diferentes da tela cintiladora, mostrando-nos uma certa dificuldade em aceitar o seu padrão de interferência.

O aluno A1 não confirma qual seria o padrão obtido, mas revela que o mesmo possui característica ondulatória, afirmando: "Mesmo só um elétron por vez, mas terá um caráter ondulatório". Nesse caso, o aluno pode estar considerando a existência de um padrão de interferência, que só pode ser determinado com a passagem de um número elevado de elétrons. Já o aluno A2 não apresentou resposta ao item, não nos possibilitando analisá-lo.

Os alunos de MQ apresentaram respostas variadas, entre as quais destacamos as dos alunos B3 e B4 (20%) que deram respostas corretas ao item, mas sem deixarem nenhuma outra informação que as garantisse. Talvez, eles estivessem tratando o elétron nesta situação como uma partícula, uma vez que em itens posteriores eles analisaram os fenômenos ali propostos, sem pensar na possibilidade da interferência.

Os alunos B6 e B9 escreveram que teríamos o mesmo padrão visto na fig.d. É uma resposta considerada errada, pois estamos considerando o lançamento de apenas um elétron. Se na questão tivesse sido esclarecido que seria lançado um elétron por vez, um após o outro, aí sim poderíamos ter o mesmo padrão visto em "d", depois de algum tempo de exposição.

O aluno B1 também escolheu um padrão, porém optou pelo padrão "a", sem fornecer nenhuma explicação para essa escolha.

O aluno B5 tem se mantido coerente nas afirmações sobre a luz. Neste item, ele considera que o elétron possui uma natureza dual, podendo ser considerado como onda ou partícula. No primeiro caso, ele "... pode sofrer uma certa difração", enquanto no segundo caso será visto um ponto na tela. Apesar de não conceber o elétron como uma onda, no primeiro instante, ele possui uma noção de que para que haja o fenômeno da difração é preciso associar ao elétron uma onda que o pilota, lembrando a interpretação dada à luz por De Broglie.

O aluno B8 mostra uma resposta que parece se apoiar numa visão puramente corpuscular para o elétron. Sua resposta ao item foi: "Não será bem visualizado. Apesar do detector detectar os 2 elétrons". Podemos supor que o problema da visualização seria devido à dimensão reduzida do elétron (neste caso dois elétrons, uma vez que passaria um por cada uma das fendas). A resposta não indica qualquer relação com o fenômeno da interferência.

Na experiência da dupla fenda, realizada por Geoffrey Taylor em 1909, a fonte de luz utilizada por ele era bastante fraca (ténue); entretanto, o padrão de interferência foi obtido, após algum tempo. Essa formação ponto a ponto do padrão de interferência, segundo Pessoa Junior (2003), ocorre mesmo que apenas um fóton ou elétron incida por vez, a cada segundo, sobre a tela cintiladora.

Os alunos B2, B7 e B 10 não apresentaram respostas, o que não nos possibilita uma análise mais detalhada.

Questão 5.b Há como saber por onde o elétron passou?

TABELA 10:
Respostas dadas à questão 5 (b):

CATEGORIAS	ALUNOS RESPONDENTES		%	
	FM	MQ	FM	MQ
Não	AI, A2, A3, A4, A5	BI,B2,B3,B9,BIO	100	50
Sim		B4, B8		20
Outras respostas		B5		10
Não respondeu		B6, B7,		20
Total	05	10	10,0	100

Todos os alunos de FM (AI, A2, A3, A4, A5) responderam, simplesmente, que não é possível, sem deixar nenhuma justificativa para a situação. É interessante lembrar que a priori a resposta está correta, uma vez que para Feynman, ao tentarmos "observar" o elétron, mudamos o seu movimento, ou seja, o solavanco dado pelo fóton no elétron altera o seu movimento, o suficiente para que não haja interferência (se comporta como partícula); se não olharmos, teremos interferência, comportando-se como uma onda (Feynman, 1999). Portanto, é impossível observar-se por qual fenda o elétron passa sem ao mesmo tempo destruir a sua interferência quântica.

Para os alunos de MQ, temos 50% (BI, B2, B3, B9, BIO) respondendo corretamente que "não", dos quais B2, B3 e B 10 responderam sem uma justificativa. Os outros alunos, B 1 e B9, deram as seguintes justificativas: "De acordo com o principio da incerteza, não" (13 1) e "Não. A figura se forma independente do orificio pelo qual passou o fóton" (139). O aluno B I foi bastante feliz quando mencionou o Princípio da Incerteza, pois segundo Heisenberg ao incidirinos radiação contra o elétron, ele vai se deslocar, devido ao choque com o fóton incidente, alterando sua posição. Se tentarmos melhorar o sistema de medida de modo a aumentar a precisão na medida da posição do elétron, não conseguiremos medir, com a mesma precisão, sua velocidade ou seu momento linear, impedindo-nos de prever o comportamento futuro desse elétron. A resposta dada pelo aluno B9 está incoerente, pois ele confunde fóton com elétron. Aqui, novamente citamos Fisciler et aL (1992), quando se refere à difração de elétrons em fenda dupla. Em sua pesquisa, ele relata que os estudantes são tentados muito facilmente a associar

fótons com partículas clássicas do que imaginar elétrons como sendo algum tipo de matéria/onda.

O aluno B4 sugere que há possibilidade se: "fecha a fenda 1 e dispara o elétron; abre 1 e fecha a 2 e dispara o elétron e compare as amostras". Ora, bem sabemos que a posição ocupada pelo elétron com uma ou duas fendas abertas, após a sua passagem, é indefinida e, portanto, teremos a mesma configuração, ou seja, se imediatamente após uma determinação de uma posição uma outra for efetuada, obteremos o mesmo resultado, com uma ou as duas fendas abertas. Já o aluno B8 sugere que haja possibilidade de se saber por onde o elétron passou através do detector. Talvez faltarmos uma informação sobre o detector, pois a função dele é detectar a posição do elétron na tela cintiladora, mostrada na figura.

Na categoria "outra resposta" encontra-se o aluno B5 afirmando: "Se pudéssemos ter uma forma de conduzir o elétron como partícula em linha reta, sim. Mas há a questão ondulatória e daí não há como; a não ser se considerarmos os vales e cristas das ondas formadas". Nota-se uma visão determinista no aluno, fruto de uma física clássica, que permite o conhecimento absoluto das variáveis de uma partícula. No entanto, tratando-se de MQ, existe o Princípio da Incerteza de Heisenberg, que proíbe a determinação precisa de grandezas como o momento e a posição simultaneamente.

Os alunos B6 e B7 não responderam ao item, impossibilitando-nos de analisá-los.

4.2 Considerações finais do pré-teste

Os resultados da investigação realizada por Ambrose *et al* (1999), em tomo da compreensão de estudantes universitários sobre óptica Física, mostram que freqüentemente nesse nível, alunos de Física Moderna confundem aspectos da óptica Física com a óptica Geométrica, dificilmente abandonam a óptica Geométrica e terminam por juntar as duas, sem perceber a diferença entre os modelos. Além disso, sua pesquisa revela que os alunos não possuem a idéia de interferência, além de confundir fótons com elétrons.

Encontramos resultados semelhantes aos dos pesquisadores citados, como por exemplo:

- Aplicação mista de conceitos da óptica Geométrica e óptica Física na explicação dos fenômenos da difração e interferência luminosa.
- Independência entre os efeitos da difração e interferência luminosa e a largura da(s) fenda(s).

Esses resultados aproximam-se do cotidiano dos alunos, que observam diversos fenômenos nos quais a luz se propaga em linha reta ao atravessar aberturas cujas dimensões são muito superiores à faixa de frequência da luz visível, conforme os resultados obtidos por Fletcher *et al* (1998).

Nossos resultados mostram ainda que, apesar de estarem cursando períodos diferentes, os alunos de Mecânica Quântica que já viram quase todos os conteúdos exigidos pelo Curso de Licenciatura em Física (programas nos anexos 1 e 2), em relação aos alunos de Física Moderna, apresentam os mesmos erros conceituais, evidenciando falta de um estudo mais detalhado do fenômeno, do ponto de vista histórico e experimental, como também nos revelam que os mesmos não tiveram uma boa base teórica em óptica Física na licenciatura, lembrando apenas de alguns aspectos vistos no ensino médio.

Essas mesmas dificuldades são encontradas com frequência em licenciados ou bacharéis em física (MONTENEGRO, 2000), quanto à interpretação desses novos paradigmas, bem como a forte resistência à mudança acompanhada de sérios erros conceituais. Essa interpretação está ligada a um ensino mais tradicional, como nos revela Agra (1994), no qual os professores limitam-se a trabalhar a Mecânica Quântica, sob a perspectiva do formalismo matemático, resolvendo problemas-padrão, sem vínculos com a realidade, e deixando de fora a interpretação física do fenômeno analisado.

Já no fenômeno da difração de elétrons, Masshadi (1996), em sua pesquisa com cinquenta e sete alunos do último nível secundário na Inglaterra, relata que 30% dos alunos conceituam o elétron como partícula e outros 60% como onda, durante o fenômeno da difração, e o restante apresenta uma relação dual para o fenômeno. Entre nós, os resultados mostram que poucos sabem identificar os fenômenos da difração e interferência, falam da dualidade onda partícula muito mais por "modismo", uma vez que ela é bastante utilizada em sala de aula por professores e quase desconhecem as interpretações usadas pela MQ. Assim, percebemos que as dificuldades dos alunos de 17M e MQ podem ser organizadas em duas grandes categorias:

- Não-aplicação da dualidade onda-partícula a fótons e elétrons, nos fenômenos da difração e interferência, sendo considerados apenas como partículas.
- Desconhecimento quase que total das interpretações usuais da MQ.

Algumas dificuldades específicas identificadas nos alunos de MQ parecem ser mais graves do que nos alunos de FM, mostrando-nos que os mesmos não possuem uma estrutura conceitual consistente para interpretar a natureza e comportamento dos elétrons no experimento da dupla fenda, ou seja, eles cometem os mesmos erros conceituais, que cometiam com a luz, quando agora utilizam elétrons no experimento.

No caso do experimento da fenda dupla para elétrons, o objeto quântico é o elétron ao invés do fóton, como nas questões anteriores do pré-teste, possuindo as mesmas características. Apesar do experimento parecer incompreensível para alguns pesquisadores, segundo Bastos Filho et al (1993), esse experimento é compatível com o

realizado para a luz, sendo, portanto, observados os fenômenos da interferência e difração, dando-lhe a ambos um caráter ondulatório. Além disso, os alunos pesquisados não relatam nada sobre as interpretações usadas na MQ, que dão sustentação teórica aos fenômenos citados, parecendo desconhecer ou não lembrar do vínculo existente.

Entendemos ser o experimento de Young da fenda dupla para a luz, no início do curso de FM, um importante aliado para uma discussão futura sobre interferência e difração de elétrons, podendo contribuir para a diminuição das distorções em suas concepções. Tal compreensão é compatível com a sugestão de Ostermann et al (2004) de utilizar a ótica Ondulatória como uma espécie de "porta de entrada" para a MQ, ao invés de, como tradicionalmente é feito, usar a Mecânica Clássica para desempenhar essa função.

4.3 Análise dos dados do Ciclo da Experiência Kellyana

A seguir apresentaremos os resultados dos questionários aplicados durante as etapas do Ciclo da Experiência Kellyana, analisando as respostas dadas a cada questão, traçando sempre uma comparação com as concepções já analisadas no pré-teste. Procuramos desde o início concentrar nossa estratégia de coleta de dados em questionários dirigidos aos alunos. Nossa principal preocupação foi sempre a de não influenciar os alunos em suas respostas; também procuramos utilizar conceitos teóricos e experimentais que são comumente abordados em cursos de MQ e que possuem respaldo científico, de modo a abarcar diversos pontos importantes referentes às interpretações da MQ, sem abordar seus aspectos matemáticos. Começaremos com o **questionário do investimento**.

4.3.1 Questionário do investimento.

Questão 01: Você leu o texto todo?

Tabela 11:

Respostas dadas à questão 01

CATEGORIAS		ALUNOS	%
	Todo	B3, B5, B6, B8	57,1
Sim	Mais da Metade	B7, B10	28,6
	Menos da Metade		
Não		B4	14,3
Total		07	100

O intuito desse questionário foi de verificar se os alunos tinham lido o texto e comparar suas concepções com aquelas detectadas no pré-teste.

Podemos perceber que a maioria (57,1%) dos alunos afirmou ter lido o texto, acompanhado de 28,6% que afirmaram ter lido mais da metade e apenas um aluno (B4) afirmou não ter lido o texto. Através dessas respostas, verificamos que podemos

comparar as concepções antes e depois da leitura, para aqueles que leram todo o material, ou mais da metade, usando os resultados obtidos no pré-teste.

Questão 02: Você consultou outras fontes, como o seu livro-texto, Internet, revistas, periódicos etc?

Tabela 12:
Respostas dadas à questão 02

Categorias	alunos	%
Sim	B4, B5	28,6
Não	B3, B6, 137,138, B 10	71,4
Total	07	100

Os livros-texto mais usados para as aulas de MQ por esses alunos foram o Halliday, vol. 4 e o Tipler, vol 4. Entretanto, de acordo com os resultados, um total de 71,4% dos alunos não teve tempo de pesquisar nem essas nem outras fontes. A justificativa mais utilizada foi dizer que se encontravam na fase final do curso, escrevendo suas monografias e que deveriam apresentá-las ainda naquela semana.

Questão 03:

A partir da leitura do texto, como você desenharia a nova fonte de onda da figura abaixo, baseando-se no princípio de Huygens?

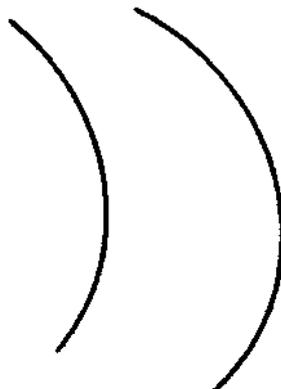
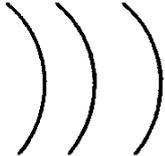


Tabela 13:
Respostas dadas à questão 03

Categorias	Alunos	%
	B3, B5, B6, B7, B8, B 10	85,7
Não respondeu	B4	14,3
Total	07	100

Esperava-se que os alunos que leram o texto desenhassem os seus modelos, considerando na frente de onda os pontos que dariam origem às novas ondas, como se encontra no texto distribuído por nós a todos os alunos, pois segundo o princípio de Huygens, "todos os pontos em uma frente de onda funcionam como fontes de ondas secundárias esféricas. Em um instante posterior, a nova frente de onda é a tangente a estas ondas secundárias" (CHAVES, 2001, p. 70).

Os alunos B3, B5, B6, B7, B8 e B10 desenharam outras ondas circulares, conforme figura na tabela, sem, no entanto, demonstrar preocupação com os pontos que lhes deram origem. Comparando com os resultados da primeira questão do pré-teste, apenas os alunos B5, B6, B7 e B10 continuaram coerentes com as respostas dadas àquela questão. Talvez o modelo de onda que eles possuem esteja associado a uns conhecimentos prévios, adquiridos em seu cotidiano ao observar uma pedra abandonada sobre uma poça de água e a conseqüente produção de ondas circulares concêntricas em torno do ponto de contato. Os alunos B3 e B8, que também leram o texto todo, deram respostas diferentes das que haviam dado no pré-teste, indicando uma possível influência do conteúdo do texto. Entretanto, eles também não deram ênfases às fontes puntiformes presentes na frente de onda.

O aluno B4, que afirmou não ter lido o texto, mas que disse ter pesquisado outras fontes, não respondeu a essa questão, impossibilitando-nos de analisá-lo. Entretanto, ele está entre os alunos de Mecânica Quântica que fizeram um desenho que se assemelha ao da difração após a fenda, na primeira questão do pré-teste.

Questão 04:

Desenhe a onda no trecho após a barreira, considerando uma propagação para a direita.

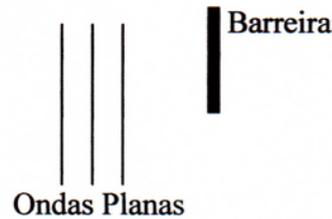
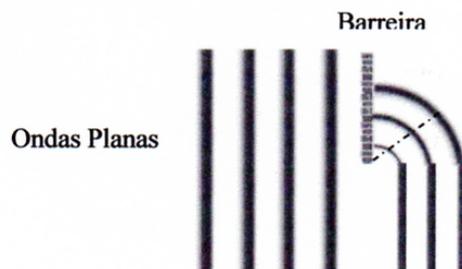


Tabela 14:
Respostas dadas à questão 04.

Categorias	Alunos	%
	B3, B5, B8, B10	57,1
	B6, B7	28,6
Não respondeu	B4	14,3
Total	07	100

Esta questão foi pensada nos mesmos moldes da terceira questão desse questionário, uma vez que a idéia central é verificar se o aluno compreendeu o princípio de Huygens, e soube aplicá-lo ao ponto da frente de onda que toca a ponta da barreira, provocando um encurvamento da onda plana apenas na parte superior, como na figura abaixo, gerando uma difração.



Entretanto, o que vimos foram alunos confusos entre o uso da Óptica Geométrica e Óptica Física. Esse resultado, entretanto, não é compatível com as idéias encontradas no pré-teste, mas pode ser explicado pelo fato dos alunos não terem estudado óptica Física em nenhuma disciplina no Curso de Licenciatura em Física da UEM

Tivemos 57,1% dos alunos (B3, B5, B8, B10) propondo que a onda plana incidente sobre a barreira tomava-se circular na parte de baixo, após ultrapassá-la. Ainda não havíamos encontrado esse tipo de concepção na nossa pesquisa, nem nas literaturas pesquisadas. Os alunos B6 e B7 fizeram desenhos mostrando ondas planas menores, na parte de baixo, talvez pensando que no obstáculo elas seriam parcialmente refletidas, enquanto o restante se propagaria normalmente.

Questão 05:

É possível se obter uma difração, substituindo-se a onda incidente na fenda simples por um feixe de elétrons?

Tabela 15

Respostas dadas à questão 05:

Categorias	Alunos	%
Sim	B7, BIO	28,6
Não	B3, B5, B6, B8	57,1
Não respondeu	B4	14,3
Total	07	100

Esperávamos que os alunos respondessem que sim, pois de acordo com o texto, podemos associar aos elétrons incidentes uma onda que os pilota, produzindo após a fenda uma difração. Entretanto, apenas os alunos B7 e BIO disseram sim, apresentando, respectivamente, as seguintes justificativas: "Sim, por sua natureza~" e "é possível por o feixe de elétrons se comportarem feito onda ou função de onda". Esses dois alunos não responderam à questão 5.a do pré-teste e declararam terem lido mais da metade do texto. Suas respostas, portanto, podem indicar uma influência do texto, pois ambas associaram

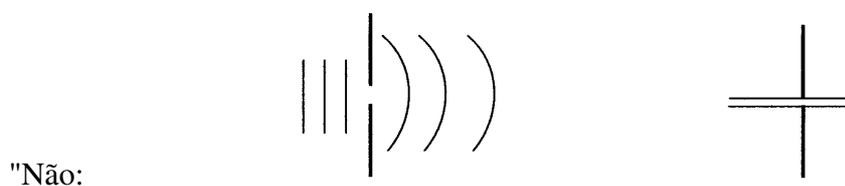
o elétron a uma onda, de acordo com a interpretação dada por Schrödinger (interpretação ondulatório-realista).

O aluno B3 deu a seguinte resposta: "não, pois um feixe de elétrons não se comporta como uma onda". No comentário da questão 5.a do pré-teste, havíamos dito que esse aluno pensava no elétron de forma corpuscular. Temos aqui uma confirmação de que ele persiste em sua concepção, ao não admitir a difração para o elétron, apesar de ter declarado que leu o texto todo.

O aluno B5, que também declarou ter lido o texto todo e inclusive ter pesquisado outras fontes, deu a seguinte resposta ao questionamento: "Não. Pois acredito que isso seja possível se no lugar de elétrons tivessem fótons". Esse aluno manteve-se coerente em suas afirmações sobre a luz, até a questão 5 do pré-teste. Na questão 5.a desse teste, ele considerou que o elétron possui uma natureza dual, podendo ser considerado como onda ou partícula. Aqui, infelizmente, ele não admite a possibilidade de difração para o elétron, contrariando sua resposta e fazendo uma reafirmação da natureza dual do fóton. Essa resposta é compatível com a literatura (FISCHLER et al, 1992), quando encontram que os alunos são tentados mais facilmente a associar fótons com partículas clássicas do que imaginar elétrons como sendo algum tipo de matéria/onda.

O aluno B6, que declarou ter lido o texto todo, afirmou que: "Não, pois a velocidade de propagação dos elétrons é muito alta". Na questão 5.a do pré-teste, esse aluno admitiu a existência de um padrão bem definido de interferência, compatível com uma visão ondulatória para o elétron. Aqui, ele apresentou um ponto de vista diferente, associando o caráter ondulatório ou não à velocidade do elétron. Dessa maneira, não é possível perceber nenhuma influência do texto sobre a resposta do aluno.

O aluno B8, que também declarou ter lido o texto todo, resumiu sua resposta em forma de dois desenhos:



Entendemos que o mesmo propõe que, para haver difração é preciso que se tenha uma onda (ver primeiro desenho). No caso de se ter um feixe de elétrons, esse passaria em linha reta (ver segundo desenho). Sua resposta está coerente com a que ele deu na questão 5.a do pré-teste, evidenciando uma visão puramente corpuscular do elétron. Novamente não percebemos nenhuma influência do texto sobre a resposta do aluno.

O aluno B4, que afirmou não ter lido o texto, mas que disse ter pesquisado outras fontes, não respondeu a essa questão, impossibilitando-nos de analisá-lo.

4.3.2 Questionário conrirmação/refutação (1' aula)

Em seguida apresentaremos as respostas dadas pelos alunos ao questionário abaixo, que foi aplicado um dia após a primeira aula, num período de cinquenta minutos.

Questão 1:

Dentre as características citadas a seguir, classifique-as de acordo com sua concepção de **onda (0)** ou de **Partícula (P)**.

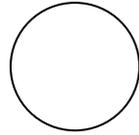
Essa pergunta refere-se aos conceitos fundamentais e essenciais para entendermos os aspectos ondulatório e corpuscular de objetos clássicos e quânticos. As respostas obtidas foram:

- *Sofre interferência* - todos os alunos (100%) foram unânimes em afirmar corretamente que a interferência é um fenômeno ondulatório. Esse aspecto foim muito enfatizado durante a aula.
- *Transporta matéria e energia* - só um aluno (134) respondeu que se tratava de uma onda, enquanto os demais (85,7%) responderam corretamente que se tratava de uma característica corpuscular. Esse aspecto foi apresentado e discutido durante os experimentos realizados na aula.
- *Transporta matéria* - dois alunos (133 e 137), correspondentes a 28,6%, disseram se tratar de uma característica ondulatória, enquanto os demais (71,4%) responderam corretamente que se tratava de uma característica corpuscular.

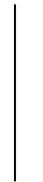
- *Está localizado no espaço* - todos os alunos (100%) responderam corretamente que se tratava de uma característica corpuscular.
- *Sofre reflexão* - três alunos (B4, B6 e B 10), correspondentes a 48,9%, responderam que se tratava de uma característica corpuscular e o restante (57,1%) afirmou que se tratava de uma característica ondulatória. Apesar das duas respostas poderem ser consideradas corretas, é interessante notar que nenhum aluno associou esta característica a ondas e partículas simultaneamente.
- *Sofre polarização* - apenas um aluno (B4) respondeu que se tratava de um fenômeno corpuscular, enquanto os demais responderam corretamente que se tratava de um fenômeno ondulatório. Esse aluno tem apresentado diversas respostas equivocadas, que não são compatíveis com a declaração que ele fez de ter pesquisado sobre o assunto.
- *Sofre refração* - apenas um aluno (BIO) afirmou que se tratava de um fenômeno corpuscular, enquanto os demais (85,7%) afirmaram corretamente que se tratava de um fenômeno ondulatório. É interessante verificar que BIO reforça sua visão corpuscular da matéria.
- *Sofre difração* - todos os alunos (100%) foram unânimes em afirmar que se tratava de um fenômeno ondulatório. Esse resultado, juntamente com as respostas sobre a interferência, reflete a ênfase dada a esses fenômenos durante a aula.
- *Está espalhada no espaço* - apenas um aluno (B7) afirmou que se tratava de uma característica corpuscular, enquanto os demais (85,7%) afirmaram corretamente que se tratava de uma característica ondulatória. O aluno B7, apesar de ter dado diversas respostas corretas, ainda conflindec algumas características das ondas e partículas (ver "Transporta matéria", acima).

Questão 2:

Através do Princípio de Huygens desenhe as ondas subseqüentes nas figuras abaixo.



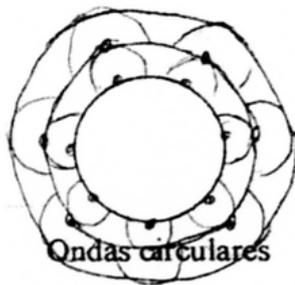
Ondas circulares



Ondas planas

Quase todos os alunos, correspondentes a 85,7%, representaram de forma correta, segundo o princípio de Huygens, a formação de ondas esféricas ou planas, tomando como base os pontos da frente de onda. Na figura abaixo (figura do aluno B3), temos um exemplo dos modelos apresentados pela quase totalidade dos alunos. Figura do B3

Figura do B3



Ondas circulares



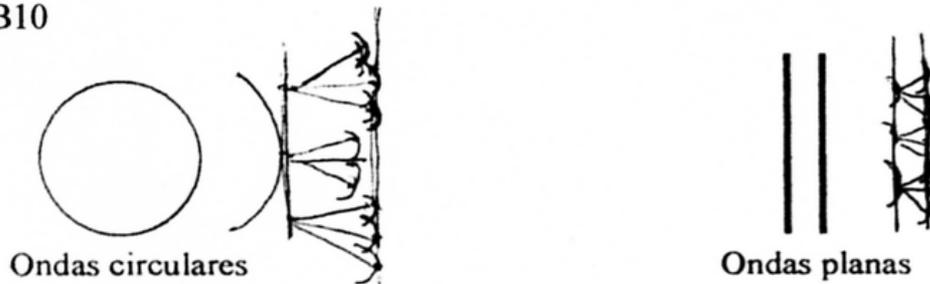
Ondas planas

Ondas planas

O aluno B 10 apresentou um modelo diferente daquele que havíamos trabalhado em sala de aula, durante a primeira aula do encontro. Perguntado sobre o desenho, o aluno respondeu que havia pensado em raios saindo de cada ponto ao longo da frente de onda, no extremo desses raios deveria ser traçada uma pequena frente de onda e, finalmente, uma envoltória, tangente a todas essas pequenas frentes de onda, tal qual as informações que ele afirmou ter recebido durante a aula (ver figuras 7 e 8, na fundamentação teórica). Neste caso, o aluno enfatizou os raios luminosos ao invés das frentes de ondas. De acordo com a construção de Huygens, esses raios são perpendiculares às frentes de ondas. Assim, o aluno fez uma construção correta, enfatizando um outro aspecto que, aparentemente, apenas ele percebeu. Esse exemplo ilustra o cuidado que devemos ter no

momento de escrever, falar ou desenhar uma determinada situação, achando que o aluno está acompanhando aquilo que queremos, enquanto ele está formando sua própria concepção, incluindo outros aspectos que não estão sendo enfatizados. Vejamos seu desenho:

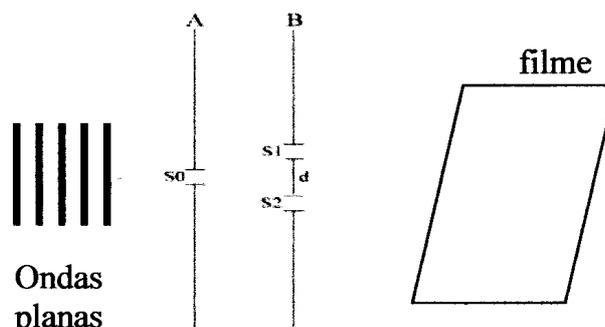
Figura de B10



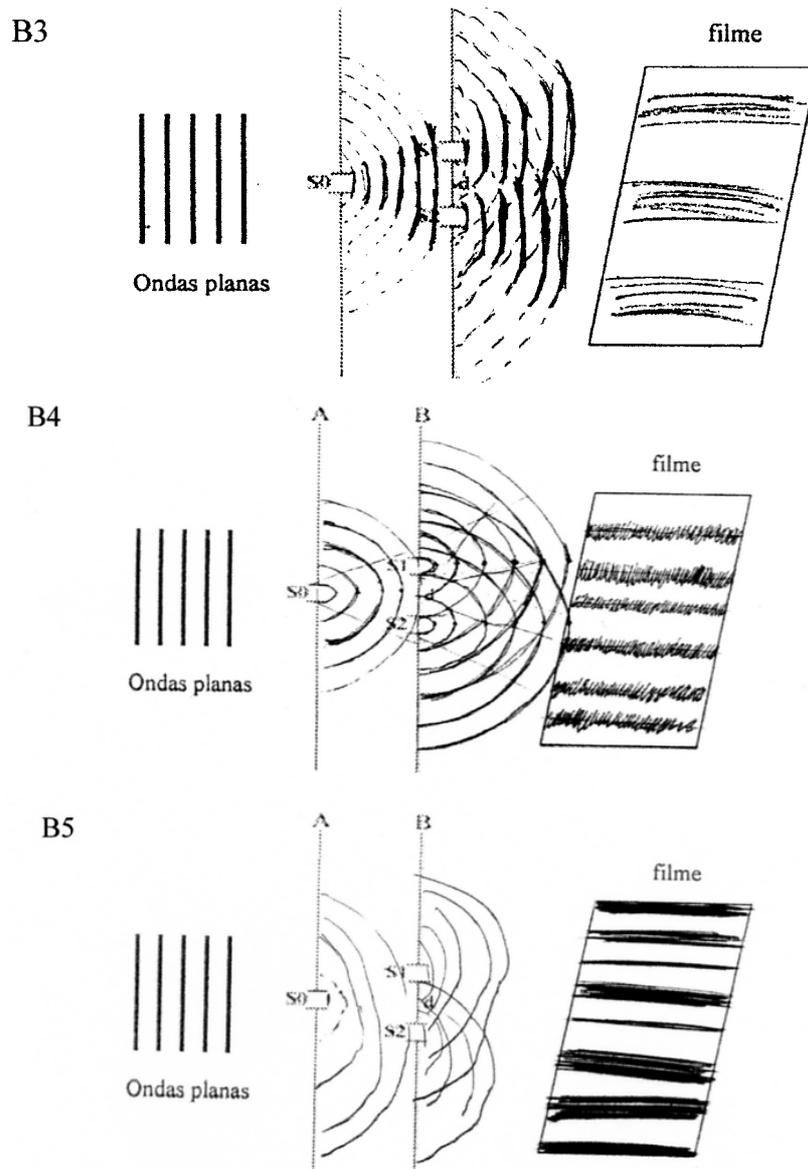
É interessante relatar que, no primeiro encontro-aula, foi surpresa para todos a forma como desenhamos o modelo de propagação de uma onda plana ou circular após a fonte, utilizando o princípio de Huygens. Todos afirmaram que jamais souberam ou aprenderam a desenhar uma onda a partir de uma fonte. Quando utilizamos o "apple" do sítio (<http://www.falstad.com>), que mostra várias formas de ondas se propagando, com ou sem obstáculo, a surpresa foi ainda maior durante o processo de contorno de ondas em uma barreira ou em duas barreiras com uma fenda no meio. Eles perceberam, nessa ocasião, que ondas são passíveis de contornar obstáculos, gerando di-, bem como é possível também mostrar o processo de interferência. Fizemos a mesma coisa com o feixe de luz (laser), sobre cílios ou pena de ave, mostrando a difração da luz e o padrão de interferência na tela.

Questão 3:

A partir da figura abaixo desenhe as ondas produzidas após os orifícios, diga que fenômeno(s) ocorre(m) e desenhe o que veremos no filme.



Os alunos B3, B6, B7 e B10 disseram corretamente quais seriam os fenômenos observados e fizeram desenhos relativos a eles. Os alunos B4, B5 e B8 não citaram os fenômenos, apenas fizeram os desenhos dos fenômenos observados. Faremos a seguir, a partir dos desenhos produzidos pelos alunos B3, B4 e B5, uma análise sistemática verificando suas possíveis concepções, após as aulas, uma vez que os desenhos dos outros alunos B6, B7, B8 e B 10 são compatíveis com suas afirmações.



O aluno B3, apesar de sua preocupação em desenhar as ondas difratadas mantendo-as corretamente planas na frente da(s) fenda(s), faz um desenho no filme que lembra um padrão de interferência, mas sem se preocupar com a posição dos máximos e dos mínimos, ou seja, sem definir se a região entre as fendas seria clara (construtiva) ou escura (destrutiva), no filme. No entanto, foi enfatizado nas aulas teóricas e durante a realização da experiência da difração da luz de laser sobre um fio de cabelo, que a

região atrás do cabelo ficava iluminada, provando-nos que ali teríamos uma interferência construtiva ou um máximo.

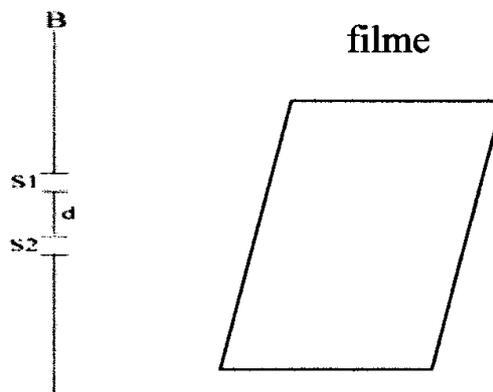
Para os alunos B4 e B5, as ondas são todas circulares após a(s) fenda(s), sem também demonstrar preocupação com a posição dos máximos e mínimos no filme, apenas desenhando-as sem dar nenhuma informação a respeito delas. B5 faz um modelo de faixa escura e clara no filme, sem obedecer à igualdade das faixas, ou seja, parecendo estar variando a largura das fendas.

4.3.3 Questionário con:rirmação/refutação (2' aula)

Em seguida, apresentaremos as respostas dadas pelos alunos ao questionário entregue no dia seguinte à segunda aula. A aula foi trabalhada especificamente utilizando as interpretações mais empregadas pela MQ atualmente, enfatizando os aspectos históricos que lhes deram origem e evidenciando também o lado experimental (do tipo virtual) dos fenômenos ali propostos.

Questão 1:

De acordo com a figura abaixo imagine um feixe de elétrons incidindo sobre o anteparo com fenda dupla. Que fenômeno(s) você espera acontecer?



Todos os alunos (100%) escreveram que se tratava dos fenômenos da difração e interferência. Os alunos passaram a apresentar uma possibilidade em aceitar que as partículas podem, dependendo do contexto e da interpretação dada, ser inseridas nos

fenômenos ondulatórios, para que assim possam compreender os fenômenos da difração e interferência, como podemos observar nas respostas dadas pelos alunos B5 e B10, respectivamente:

- "O resultado do fenômeno terá uma forma idêntica ao experimento realizado por Young, ou seja, teremos um padrão de interferência de elétrons com regiões mais claras e outras escuras (fenômenos da onda)".
- "Fenômenos da difração e interferência dos elétrons, um clarão e uma parte escura, os fótons interferem consigo mesmo"

O aluno B5 estabelece uma relação entre os elétrons e os fótons, ressaltando a característica ondulatória dos dois. Enquanto isso, o B 10 apresenta uma particularidade da definição dada pela escola de Copenhagen (interpretação da complementaridade ou dualismo positivista) quando se refere à interferência dos elétrons consigo mesmos após as fendas. O aluno B 10 parece confundir elétron com fóton, talvez por pensar que ambos são partículas que apresentam características ondulatórias.

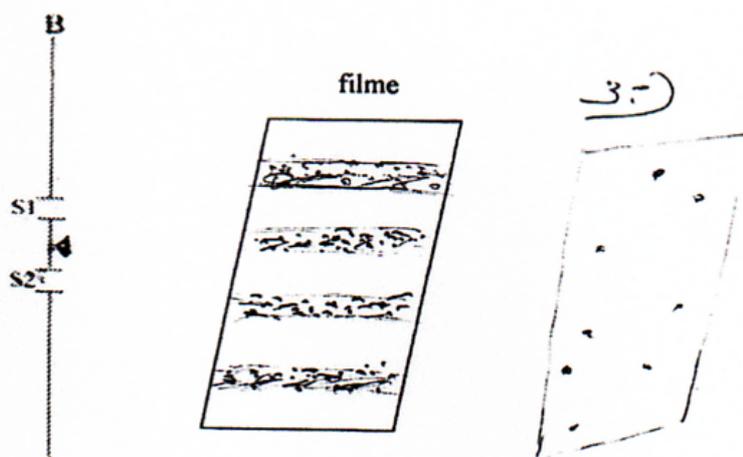
Questão 2:

O que veríamos na tela (filme) se lançássemos um feixe de elétrons sobre o anteparo com fenda dupla?

Todos os alunos (100%) fizeram um desenho no filme da figura anterior, de um modelo representativo de um padrão característico de franjas de interferência, construtiva e destrutiva, como na resposta do aluno B7 ou no desenho do aluno B 10, respectivamente:

"Veremos, dependendo da quantidade de feixe de elétrons, alguns borrões, mostrando regiões claras e escuras".

Figura de B10



Aqui, também, os alunos desenharam as fi-anjas, de todo jeito, sem nenhuma preocupação com as regiões de máximo e mínimo. Na utilização das simulações virtuais realizadas em sala de aula, utilizando um software livre, no qual podíamos "observar" a difração de partículas em fendas dupla e simples, o seu padrão de interferência para muitas partículas (elétrons ou fótons) ou para só uma partícula lançada continuamente, uma após a outra e durante um longo tempo de exposição, bem como alterar a distância entre as fendas, produzindo o mesmo padrão. A única diferença entre o padrão da figura 12, da nossa fundamentação teórica, e o padrão de interferência visto na simulação é que na figura 12 temos um filme que fixa a imagem, no outro, uma tela fosforescente cintilante que só capta o ponto luminoso, para em seguida apagar.

Questão 3. E se fosse só um elétron de cada vez?

Esperávamos que os alunos lembrassem das interpretações dadas pelos irrisicos a esse fenômeno, discutidas em sala de aula ou talvez que lembrassem dos experimentos virtuais realizados, quando alterávamos o número de partículas incidentes, o tempo de exposição, a largura da fenda etc, e respondessem que teríamos apenas uma cintilação pontual no filme, sem a formação de um padrão espacialmente estendido, do tipo obtido para um grande número de elétrons. Entretanto, se considerarmos o tempo de exposição dos elétrons atingindo o filme em posições diferentes, como é de se esperar, teremos a mesma configuração vista para um grande número de elétrons, como nos revelam os alunos B4 e B7, respectivamente: "observaríamos um ponto no filme e com o passar do tempo devido o numero de elétrons que seria bem maior observaríamos a interferencia

no filme". E "se fosse só um elétron, apresentaria um pequeno ponto no filme e teríamos o mesmo resultado".

É importante acrescentar que o processo da interferência ocorre ao longo do percurso entre a(s) fenda(s) e o filme, e que durante a detecção formam-se os padrões de máximos e de mínimos, de forma corpuscular, como argumentaram B5 e B6, respectivamente: "depois de muito tempo de exposição de um elétron continuamente, isto é, os elétrons, vão atingindo o filme um a um ao longo do tempo e perceberemos que os mesmos formarão o mesmo padrão de **interferência que é observado antes em experimentos por Yotting, quando** os elétrons percorrem a sua trajetória passando pelo anteparo B até num determinado momento antes de atingir o filme, terá característica ondulatória, ao atingir o filme terá característica corpuscular. (dualidade)". E "Depois de muito tempo seria visto o mesmo padrão de interferencia, visto se lançássemos um feixe de elétrons sobre um anteparo com fenda dupla".

Tivemos várias respostas que são possíveis representações esquemáticas, oriundas da forma como eles interagiram com o assunto, associando-as às interpretações discutidas em sala de aula. Vejamos o que disse o aluno (B 10): "como é um só elétron temos um padrão de interferência contínuo; elétron interfere consigo mesmo". Esse aluno usa a interpretação dada pela complementaridade de Bohr e Paul Dirac e refere-se a uma interferência contínua, talvez pensando numa exposição mais demorada. Durante a realização da experiência virtual com elétrons em fenda dupla, alertamos os alunos para o fato da visualização do padrão de máximos e mínimos na tela fosforescente ser rápido, ao contrário da experiência realizada com o feixe de laser sobre o fio de cabelo, em que tínhamos vários pontos de luz na parede, em especial uma região mais clara atrás do cabelo. Na terceira questão, foi enfatizado que ao invés de uma tela, teríamos um filme e que uma vez atingido, o padrão permaneceria. Assim, argumentaram os alunos B3 e B8, respectivamente: "mesmo que os elétrons passassem pela fenda um de cada vez, teríamos o mesmo resultado que o obtido por um feixe de luz incidente no anteparo, porém o resultado se processaria de forma mais lenta". E "ocorre o mesmo do anterior, porém mais lento".

É notável que todos os alunos tenham tido um bom nível de acerto dentro das expectativas, ou seja, os resultados até então obtidos no primeiro questionário confirmação/refutação, revelaram uma melhora significativa no sistema de construção dos alunos, no que diz respeito à idéia de onda, sua formação, suas características e os fenômenos a ela associados. Isso nos mostra que a idéia de se trabalhar, no início da disciplina de FM, os conceitos fundamentais da Física Ondulatória e seus respectivos fenômenos, são, como diz Ostermann et al, (2004, p. 12), "a porta de entrada da MQ".

Na segunda aula, optamos por elaborar uma unidade didática eminentemente conceitual e experimental (virtual) sobre o tema difração de elétrons, que mostrou um avanço em relação à abordagem tradicional, em que os professores se limitam a explorar o formalismo matemático da Mecânica Quântica em resolução de problemas-padrão e sem vínculos com a realidade, deixando de fora a interpretação física do fenômeno analisado. Além disso, enfatizamos alguns experimentos mentais (*gedanken*), do tipo usado por Feynman (1999) em seu livro "Física em seis lições", cujo texto foi discutido por nós em sala de aula.

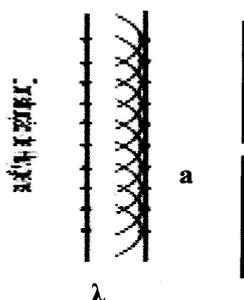
Nessa ocasião, oportunizamos aos alunos a utilização dos softwares, instigando-os a explorar todas as possibilidades oferecidas por esses recursos, na tentativa de fazê-los compreender os conceitos teoricamente abordados em sala de aula. A partir das respostas dadas ao segundo questionário, acreditamos que o uso do Ciclo da Experiência Kellyana constitui uma estratégia relevante para que o professor desempenhe o seu papel de promover mudanças nas concepções dos alunos, gerando assim novos construtos.

4.4 Análise dos dados do pós-teste

Analisaremos, nesta seção, as respostas dadas pelos alunos às mesmas questões colocadas no pré-teste, após a realização de todo o Ciclo da Experiência Kellyana, para em seguida discutir as possíveis alterações ocorridas no sistema de construção dos alunos em relação à difração de elétrons. Vale salientar que o questionário aplicado para o pós-teste corresponde à revisão construtiva de todo o Ciclo da Experiência Kellyana. Foi aplicado no dia seguinte ao segundo questionário confirmação/refutação (2a aula).

Questão 1 Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira, na qual foi feita uma pequena fenda de abertura a:

Figura 01



- a) Desenhe, após a fenda, a representação dessas ondas, usando a construção de Huygens.

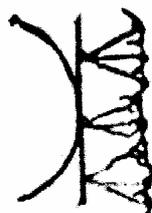
Quadro 01:

Respostas dadas à questão 1.a do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B4, B6, B7 e B10		Desenham obedecendo ao princípio de Huygens
B5		Desenha obedecendo ao princípio de Huygens
B8		Desenha obedecendo ao princípio de Huygens
B3	Não respondeu	Desenha obedecendo ao princípio de Huygens

A totalidade dos alunos respondeu de forma correta ao desenharem a onda formada após a fenda obedecendo ao princípio de Huygens, a partir das frentes de onda. O aluno B10 continuou apresentando o seu modelo com raios saindo de cada ponto da frente de onda, para em seguida traçar a envoltória, como já havia feito na questão 2 do questionário confirmação/refutação da primeira aula. Vejamos:

Figura de B 10



b) Que tipo de fenômeno ocorreu após a passagem do feixe de luz através da fenda?

Quadro 02:

Respostas dadas à questão 1.b do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B6, B7 e B10	Di~	Difração
B4 e B5	Outras respostas	Difração
B3	reflexão	Difração
B8	Não respondeu	Difração

Os alunos B6, B7 e B 10 continuaram consistentes com suas respostas ao item anterior (1.a) e ao fenômeno correspondente (1.b), ou seja, responderam que se tratava de uma difração, tanto no pré-teste como no pós-teste. O aluno B4, que apresentou uma resposta incompreensível no pré-teste, passou a ter uma compreensão melhor dos fenômenos ondulatórios. O aluno B5, que no item La, do pré-teste, fez um desenho bem detalhado do encurvamento das ondas após a fenda, apesar de não citar a difração no item 1.b, ele relaciona o fenômeno da seguinte maneira: "É um fenômeno ondulatório, onde a onda se propaga como se fosse uma fonte de luz puntiforme". Esta explicação lembra mais o Princípio de Huygens do que o fenômeno da difração. Portanto, o aluno B5, obteve um ganho conceitual satisfatório no pós-teste.

O aluno B3, que não respondeu ao item anterior (1.a) e disse que se tratava da reflexão no item 1.b, respondeu agora de forma satisfatória, assinalando para uma compreensão melhor dos fenômenos ondulatórios. O aluno B8, que pensava na propagação retilínea da luz após a fenda, no pré-teste, também apresentou uma resposta satisfatória.

c) **Qual a influência da largura (a) da fenda** e o comprimento de onda da luz incidente (λ) sobre o fenômeno que ocorre após a passagem do feixe de luz através da fenda?

Quadro 03:

Respostas dadas à questão 1.e do pós-teste.

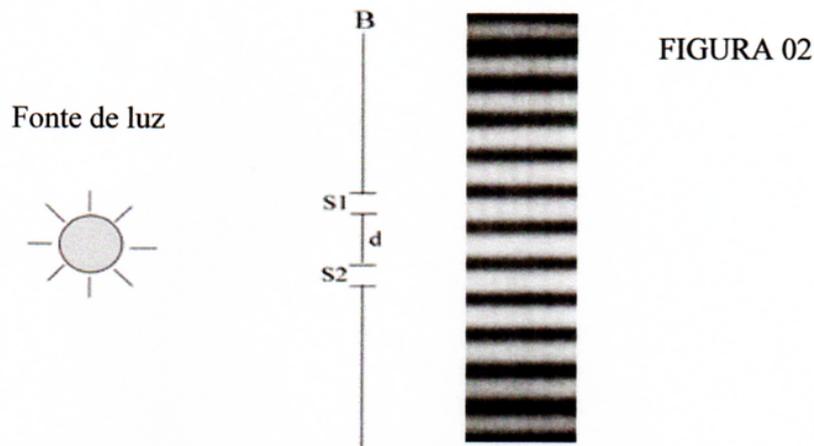
Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Quanto maior a e k maior o número de ondas que atravessam	A largura da fenda e o comprimento de onda têm que ser da mesma ordem.
B4	Se $a < \lambda$ não haverá passagem da onda	Se $a > \sim$, não ocorrerá o fenômeno.
B5	Se a aumenta, temos uma fonte extensa	Para melhor efeito ou maior clareza da difração devemos ter $X \sim: a$.
B6	Se $\lambda > a$, haverá di-	Para uma melhor visualização é necessário que a largura da fenda seja da mesma ordem do comprimento de onda.
B7,	Não respondeu	O comprimento de onda deve ser da ordem da largura da fenda.
B8	Não respondeu	Quanto menor a fenda melhor será a visualização do fenômeno da difração.
B10	Se $\lambda \geq a$, haverá difusão	Quanto maior a largura da fenda maior será a passagem de luz, isto é, o comprimento de onda aumenta se a fenda aumentar

Os alunos B4, B5, B6, B7 e B8, apresentaram um ganho (71,4%) conceitual na compreensão da largura da fenda, para que ocorra o fenômeno da difração das radiações. Destes, apenas os alunos B5, B6 e B8 relataram, conforme vemos na tabela 18, que para se ter uma boa visualização do fenômeno da difração, o comprimento de onda da luz incidente deve ser da ordem da largura da fenda. Dos alunos que deram respostas corretas ao item 1.e do pré-teste (B6 e B 10), apenas B 10 apresentou uma resposta incompreensível no pós-teste. Já o aluno B3, que inicialmente relata: "A largura da

fenda e o comprimento de onda têm que ser da mesma ordem..." termina sua frase de forma confusa quando diz: "... e quanto menor o comprimento de onda melhor será a visualização da difração". Provavelmente, deve está confundindo com a largura da fenda.

Questão 2

Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira com duas fendas de mesma abertura ($s_1 = s_2$), com uma distância d entre si ($s_1 \leq \lambda$). Após a barreira existe um anteparo fixo.



a) Após a passagem da luz através das fendas ocorrem dois fenômenos ópticos. Quais são eles?

Quadro 04:

Respostas dadas à questão 2.a do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B5, BIO	Difração e interferência	Difração e interferência
B3	Reflexão e absorção	Difração e interferência
B4	Difração	Difração e interferência
B6	Difração e reflexão	Difração e interferência
B7	Reflexão e difração	Difração e interferência da luz, pelo fato da luz contornar a barreira e pode-se observar no filme regiões

		claras e escuras pela interferência da luz.
B8	Não respondeu	Difração e interferência

Todos os alunos responderam corretamente (100%) que se tratava dos fenômenos da difração e interferência da luz. O aluno B7, foi mais enfático quando relata a respeito do padrão de interferência formado na tela. Os mesmos resultados já tinham atingido na primeira fase da confirmação/refutação da 1ª aula-encontro.

b) A que correspondem as regiões claras e escuras no anteparo?

Quadro 05:

Respostas dadas à questão 2.b do pós-teste.

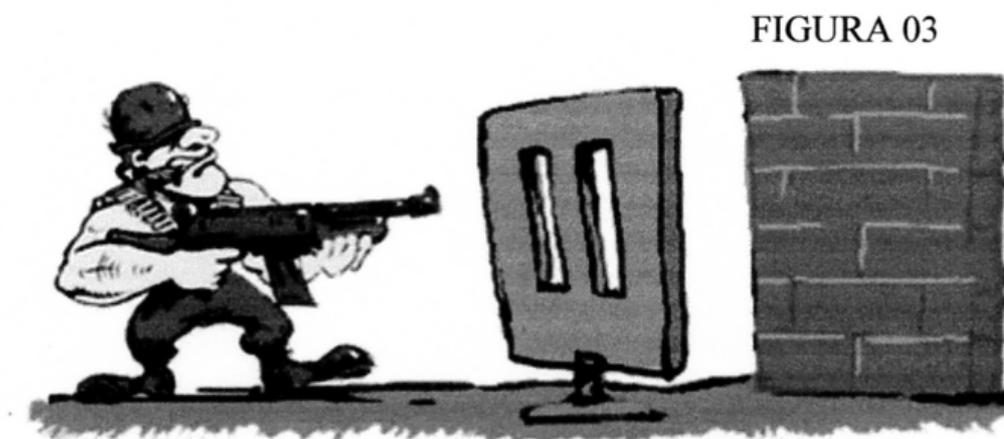
Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Claras - luz refletida Escuras - luz absorvida	Aos padrões de interferência: as regiões claras correspondem as interferências construtivas e as escuras as destrutivas.
B4	Claras- incidência de elétrons Escuras- ausência de elétrons	Claras - ondas construtivas Escuras - ondas destrutivas
B5	Escuras - vale Claras - picos ou cristas	As interferências ocasionadas devido as ondas construtivas - regiões claras e destrutivas - regiões escuras.
B6	Outras respostas	A parte clara é a região de máxima (interferência construtiva) e a parte escura corresponde a região de interferência destrutiva
B7	Escuras - ondas se anulam Claras - ondas se somam	Difração e interferência da luz, pelo fato da luz contornar a barreira e pode-se observar no filme regiões claras e escuras pela interferência da luz.
		Corresponde aos padrões de

B8	Outras respostas	interferências: construtiva- branca e destrutiva - escura.
BIO	Interferência	Interferências construtiva - região clara e interferência destrutiva - região escura.

Esses resultados, juntamente com as respostas dadas aos itens b e e da questão 01 e ao item (a) da questão 02, constituem a base para uma boa compreensão da física dos fenômenos ondulatórios. Aqui, também, tivemos um resultado satisfatório (71%), em se tratando do efeito visual no anteparo. Apenas os alunos B4 e B5 (29%), apresentaram respostas confusas, quando escrevem que os efeitos correspondem a "ondas construtivas e ondas destrutivas". Provavelmente, eles estão confundindo ondas com regiões.

Questão 2.c

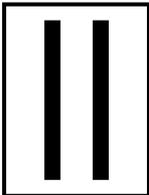
Se um feixe de partículas em movimento (metr~ora de partículas) fosse interceptado pelo obstáculo da figura 3 abaixo, o que veríamos no anteparo? Justifique. Qual a relação com o padrão da figura 2?



Quadro 06:

Respostas dadas à questão 2.c do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Veríamos apenas um quadrado ou Retângulo	Veríamos o mesmo padrão de interferência, pois em ambos os experimentos ocorrem os mesmos fenômenos (dif~ e interferência),

		uma vez que as partículas (fig.3) interferem consigo mesmo.
B4	Veremos a figura 2 na vertical.	Veríamos listas formadas pelas partículas ao tocarem no anteparo. A relação é que em ambos observaremos a mesma interferência no final, se considerarmos as partículas com mesmo diâmetro da fenda.
B5		Observaríamos o desenho das fendas no muro pois caracteriza como corpúsculo. No caso da figura dois observamos dois tipos de fenômenos ao difi~ ela possui característica ondulatória e posteriormente sofre interferência especificando seu comportamento corpuscular.
B6	Veremos a figura 2 na vertical.	Considerando o comprimento de onda das partículas lançadas na mesma ordem das fendas, obteremos o mesmo padrão da figura 2, pois as partículas antes e após o anteparo se comportam como ondas sofrendo difração e interferência formando o padrão da figura 2, obtido para um feixe de luz.
B7	Veremos a figura 2 na vertical.	Considerando o tamanho da partícula como o tamanho da fenda terá o mesmo padrão da figura 2, já que a largura da fenda influi. Observaríamos no muro regiões atingidas pelo feixe de partículas, pelo fato de se caracterizar por corpúsculos. Já na figura 2 o feixe incidente é de luz e sua natureza é ondulatória antes de atingir o anteparo e depois é partícula.
B8	Não respondeu	Veríamos o mesmo ocorrido na figura 2 que é o principio de Yoting. (difi-ação e interferência)
BIO	São fenômenos diferentes: fig. 2 são ondas e fig. 3 são partículas	Veríamos o mesmo padrão nos dois casos porque ocorre a difi-ação e intederência nos dois casos considerando a fenda bem pequena.

Se olharmos com cuidado as respostas anteriores (do pré-teste) desses três alunos B4, B6 e B7, veremos que eles não tinham clareza sobre a origem dessas faixas claras e escuras. Assim, eles simplesmente aceitavam como verdadeira a informação dada na figura 2 e consideravam que ela se repetia na figura 3, ou seja, eles não tinham noção naquele momento, sobre a identidade do fenômeno, baseando suas informações em aspectos fenomenológicos. Para esses alunos, tanto a luz quanto as partículas, ao

atravessarem as duas fendas, sofriam os mesmos tipos de fenômenos. Verificando as respostas dadas ao pós-teste, para a mesma questão, notamos um avanço conceitual satisfatório, ou seja, esses alunos são unânimes em confirmar o mesmo padrão da figura 2, para as partículas lançadas, inclusive relatando a respeito da largura da fenda em relação ao comprimento de onda das partículas (B6), para que ocorra o fenômeno e confusamente B4 e B7 falam de tamanho ou diâmetro da partícula.

O aluno B10, que responde corretamente sobre os padrões observados, também lembra de fazer referência à abertura da fenda, além de passar a associar onda/partícula, que ele não concebia no pré-teste.

O aluno B5, que respondeu corretamente aos itens anteriores do questionário, continua considerando o comportamento corpuscular dessas partículas e sua conseqüente concentração em duas áreas do anteparo, como tinha pensado no pré-teste e sem relacionar a situação dessa questão com a figura 02 desse questionário, limitando-se a explicá-lo. Parece estranho, pois no questionário confirmação/refutação da 2ª aula, ele ressalta a característica ondulatória dos elétrons. Ao final de sua explicação, ele escreve que "... ao difratar ela possui característica ondulatória e posteriormente sofre interferência especificando seu comportamento corpuscular". Provavelmente, ele esteja querendo dizer que a visualização do padrão seja possível com a detecção das partículas no filme.

O aluno B3, que não respondeu corretamente às questões anteriores do pré-teste e fez uma analogia entre a situação da figura 3 e a propagação retilínea da luz, sem levar em conta nenhum aspecto ondulatório, apresenta agora um aprimoramento em seu conhecimento em MQ, quando responde corretamente sobre os fenômenos observados, além de ressaltar que "... as partículas interferem consigo mesma", evidenciando a interpretação dada por Paul Dirac ou Bolir, para a interferência de partículas.

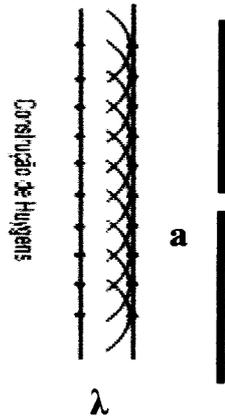
Já o aluno B8, apresentou um ótimo rendimento, em relação às concepções que possuía antes da realização do Ciclo da Experiência Kellyana, quando concebia a luz na experiência da dupla fenda, trajetórias retilíneas, de acordo com a tabela 16. Nesta

questão ele se refere ao mesmo padrão visualizado na experiência realizada por Young para a luz.

Questão 3:

Nessas duas situações (figuras 1 e 2), a luz se comporta como partícula (como Newton pensava) ou uma onda (como Huygens e Young afirmavam) ? Justifique.

Figura 01



Fonte
de luz

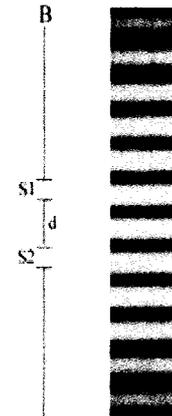
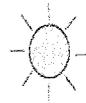


figura02

Quadro 07:

ReSDOstas dadas à questão 3 do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	A luz ora comporta-se como onda e ora como partícula	Em ambos os experimentos (fig. 1 e 2) a luz se comporta como onda antes e depois de passar pelo anteparo, e como partícula ao passar pela fenda e na fig. 2 ao bater na barreira.
B4	Como onda	Tanto como Newton pensava e como Huygens e Yoting. Ao tocar o anteparo (1) ele é partícula, depois se comporta como onda gerando difração, após temos partícula ao tocar o anteparo (2) formando o mesmo padrão de interferência em ambos.
	A luz ora comporta-se como onda e	Nas figuras 1 e 2 temos um comportamento de luz como Huygens

B5	ora como partícula	afirmava, ou seja, comportamento ondulatório no P caso (fig. 1), e dual (fig.2) onda e partícula.
B6	Como onda	Nas figura (1 e 2) a luz se comporta como Huygens e Young afirmaram, pois Newton não comprovou a difração e considerou a luz apenas como partícula.
B7	Como onda	Como Huygens, a luz se comporta como onda, pois quando o feixe de luz antes de incidir no anteparo se comporta como onda e depois de incidir é partícula, pois nas duas situações ocorrem interferência e difração, na figura 1. Na figura 2 tem o comportamento dual, onda e partícula.
B8	Como partícula	As partículas iriam se comportar como onda antes da fenda, partícula nas fendas, onda entre as fendas e o anteparo e como partícula no anteparo
B10	Como onda	Nas duas situações se comporta como onda porque está ocorrendo difração como Huygens afirmava

Em geral, todos os alunos associaram os fenômenos da difração e interferência da luz, aos aspectos ondulatórios, como Huygens e Young afirmavam. De uma maneira geral, esperávamos uma resposta mais simples, ou seja, que eles dissessem apenas que se tratava de um fenômeno ondulatório, de acordo com as informações nos princípios de Huygens e Young, como afirmaram os alunos B6 e B 10.

Os outros alunos (B3, B4, B5, B7 e B8), entretanto, na justificativa a essa questão, foram mais enfáticos, quando acrescentaram outras interpretações usadas pela MQ, para melhor explicar o comportamento da radiação antes, durante, após a(s) fenda(s) e no anteparo. Acreditamos, que esse acréscimo de informações nas respostas à questão, não as desmerecem, apenas elas ficaram mais precisas, recheadas de mais informações, pois é inegável que questões do tipo abertas, são bastante reveladoras com relação aos processos cognitivos dos alunos ou aos novos construtos, além de revelar seus aspectos epistemológicos, como nos revela Bastos filho (2003).

Todos esses alunos citados, são implacáveis com relação ao colapso da função da onda na(s) fenda(s) ou no anteparo, como escreveu o aluno B8: "As partículas iriam se comportar como onda antes da fenda, partícula nas fendas, onda entre as fendas e o anteparo e como partícula no anteparo". Desta forma temos conjuntamente uma característica ondulatória, a interferência, e uma característica corpuscular, a detecção pontual ("bem localizada") dos quanta. Quando colocamos detectores nas fendas, produzimos o colapso da função de onda antes que a função de onda tenha a oportunidade de interferir consigo própria (NUSSENZVEIG, 1998).

Questão 4:

No final do século XIX, Hertz testou experimentalmente a natureza da luz, deduzido por Maxwell, como onda eletromagnética. No entanto, em 1905, Einstein explicou teoricamente o efeito fotoelétrico, constatado no próprio experimento por Hertz e posteriormente por Lenard, concluindo que a luz é formada por partículas, que ele chamou de fótons. Diante deste relato histórico, o que você diria sobre a natureza da luz? Justifique.

Quadro 08:
Respostas dadas à questão 04 do pós-teste.

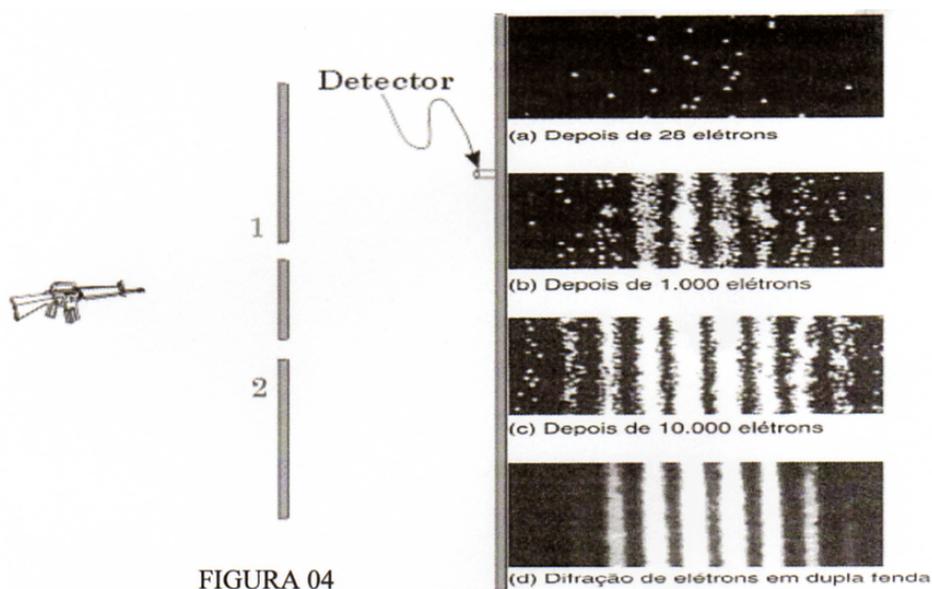
Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Em alguns casos a luz se comporta como onda e em outros como partícula	A luz tem natureza dual, em determinados experimentos ela se comporta como partícula e em outros como onda.
B4	A natureza da luz é onda e partícula-	Conclui-se que a luz comporta-se como partícula em determinados experimentos.
B5	Como partícula	No final do século XIX os cientistas acreditavam que a luz era uma onda, em 1905 com Einstein ela era corpuscular, posteriormente com De Broglie ela tinha característica dual (onda de matéria).
B6	Em alguns casos a luz se comporta como onda e em outros como partícula	A luz tem característica tanto de onda quanto de partícula, dependendo do experimento utilizado. Por exemplo para Hertz e Maxwell, onda, já para Einstein e Lenard partícula.
B7	A natureza da luz é onda e partícula.	A natureza da luz é dual, pois depois dos experimentos realizados pode verificar que quando se sabe a posição da luz é partícula e quando não se determina é onda.
B8	A natureza da luz é onda e partícula.	A luz tem efeito dual. A luz se comporta como partícula e onda.
BIO	A natureza da luz é onda e partícula.	A luz se comporta como onda em alguns experimentos e como partícula em outros experimentos mas a natureza da luz é dual, isto é, uma complementa a outra como diria De Broglie.

Os alunos B3 e B6, que no pré-teste apostavam que a natureza da luz era revelada a partir do experimento realizado, continuam defendendo essa versão no pós-teste, cuja interpretação segue a explicação dada pela Escola de Copenhague ou interpretação da Complementaridade, como é mais conhecida e bastante difundida entre professores e alunos de ambas as disciplinas de FM e MQ da UEM

Os alunos B4, B7, B8 e B 10 que apresentaram no pré-teste, suas concepções mais voltadas para uma natureza dualista-realista, em que é possível associar uma onda (onda piloto) a uma partícula (fóton ou elétron) com trajetória bem definida (mas desconhecida), passaram a associar novos construtos a essa interpretação, no pós-teste, dando-lhe um aspecto dual. O aluno B5, que possuía urna interpretação corpuscular no pré-teste, passou a ter uma concepção satisfatória, mais voltada para uma versão dualista, no pós-teste. Vemos aqui uma outra interpretação dualista. Isso nos mostra que apesar de os professores declararem que enfatizam o modelo de dualidade proposto por Bohr, ainda encontramos alunos com a visão dualista-realista de De Broglie.

Questão 5:

Um feixe de elétrons é disparado contra uma barreira, conforme a figura 04, passando por duas fendas de mesma abertura e formando os padrões mostrados na figura abaixo, sobre uma tela cintiladora, em que eles são detectados.



a) Que padrão você espera obter com a passagem de apenas um elétron pelas duas fendas?

Quadro 09:

Respostas dadas à questão 5.a do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Observaremos um ponto	0 mesmo padrão de interferência obtido na experiência com feixe de $1u7$, porém o resultado seria alcançado em um tempo bem mais longo.
B4	Observaremos um ponto	Vamos visualizar um ponto sofrendo o mesmo padrão de interferência sofrido se fosse vários elétrons.
B5	Um ponto ou um padrão de difração.	Após o decorrer do tempo observaríamos um padrão de interferência semelhante ao da figura 4d.
B6	Padrão D	Será obtido o mesmo padrão de interferência da fig. 4 (d) após algum tempo-
B7	Não respondeu	Padrão de interferência contínuo, consigo mesmo, semelhante ao da fig. 4 (d).
B8	Outras respostas	Obteremos o mesmo fenômeno. Porém, com um tempo, devido a pequena quantidade de elétrons. (um elétron).
BIO	Não respondeu	Com a passagem de um elétron existe um padrão de interferência ocasionado pela interferência de elétrons e também os fótons consigo mesmo.

Nas respostas dadas ao pré-teste, apesar de B3, B4 e B5 terem respondido de forma correta, eles não apresentaram justificativas consistentes para interpretar a natureza e comportamento dos elétrons nesse experimento, ou seja, eles cometeram os mesmos erros conceituais, que cometiam com a luz, quando agora utilizam elétrons no experimento. Suas respostas ao pós-teste revelam uma compreensão correta para um

grande número de elétrons incidindo sobre as fendas ou referente a um tempo de exposição prolongado. Entretanto, a questão não faz referência a tempo de exposição ou lançamento contínuo de elétrons. Portanto, a resposta esperada era que haveria apenas uma cintilação pontual na tela ou talvez que eles afirmassem que haveria uma cintilação na tela, que estivesse localizada em qualquer posição permitida pelo padrão de interferência que se obtém quando se utiliza um grande número de elétrons. Acreditamos que eles quiseram ser mais enfáticos em suas respostas, como B4 sugeriu.

O aluno B6 que escreveu no pré-teste que veríamos o padrão D da figura, sem nada ter esclarecido, responde agora no pós-teste que teríamos o padrão D após algum tempo de exposição, acompanhado de B7 e B8.

O aluno B10, que no pré-teste não respondeu a essa questão e no encontro confirmação/refutação (2ª aula), confundiu elétron com fóton, talvez por pensar que ambos são partículas que apresentam características ondulatórias, continua a apresentar suas concepções dentro desse contexto, no pós-teste, acrescentando apenas que o padrão de interferência ocorre entre eles, numa visão da complementaridade.

b) Há como saber por onde o elétron passou?

Quadro 10:

Respostas dadas à questão 5.b do pós-teste.

Aluno	Pré-teste	Pós-teste
B3	Não	Não, pois ao tentar observar por onde o elétron passa desviaríamos este, interferindo no fenômeno.
B4	Sim	Não, pois para observar teria que iluminar o elétron e se iluminar, a luz irá interferir.
B5	Outras respostas	Não, pois ao tentarmos observar os elétrons interferimos no fenômeno, ao observar precisamos de luz o que ocasionará um desvio no elétron.
B6	Não respondeu	Não, pois ao tentar observar a passagem do elétron pelas fendas a sua trajetória será modificada.
B7,	Não respondeu	Não dá para saber por onde o elétron passou, porque quando observamos não há interferência.
		Não, pois se tentarmos ver iremos

B8	sim	modificar o experimento (iremos jogar luz) modificando o fenômeno.
BIO	Não	Não há como saber por onde o elétron passa, porque se observamos não há interferência isto é só há interferência quando o fenômeno não é observado.

Todos os alunos foram unânimes em responder que não poderíamos saber por qual das fendas o elétron passou, dando explicações compatíveis como o ponto de vista do "experimento do pensamento", realizado por Feynman (1999) em seu livro "Física em seis lições", cujo texto foi discutido por nós em sala de aula.

4.5 Considerações finais do pós-teste

No pré-teste, os alunos de MQ tiveram dificuldades em entender fenômenos exclusivamente ondulatórios, usando uma interpretação corpuscular, como por exemplo, na difração da luz. Já no pós-teste, além de compreenderem que se tratava de um fenômeno ondulatório, acrescentaram ainda que a boa visualização da figura apresentada se dava por conta da relação entre o comprimento de onda da luz e a abertura da fenda. A maioria dos alunos de MQ, futuros professores, revelaram ser capazes de caracterizar os objetos quânticos e diferenciá-los dos clássicos, como, por exemplo, associando a detecção pontual aos objetos clássicos, e o caráter probabilístico aos quânticos; invocando as interpretações mais aceitas atualmente e a dualidade onda-partícula como aplicáveis apenas ao mundo quântico.

Em síntese, as respostas dadas ao pós-teste, como revisão construtiva, mostraram que houve mudanças nas concepções dos alunos, em relação ao pré-teste, e que elas não ocorreram ao acaso, mas provavelmente como consequência da abordagem do Ciclo da Experiência Kellyana, uma vez que, quanto maior a quantidade de revisões realizadas de um mesmo evento, maior será a variação no sistema de construção do aluno (BASTOS, 1992).

4.6 Entrevista

Tendo em vista as ambigüidades permitidas por questionários abertos, resolvemos utilizar três questões acerca da difração e interferência de elétrons, para através de entrevistas individuais, aprofundar os aspectos que foram trabalhados no Ciclo da Experiência, já que a entrevista oferece aos participantes um grau de liberdade maior, em função dos aspectos mais relevantes do problema (RICHARDSON, 1999). Em seguida, apresentaremos os resultados obtidos.

Ao ser indagado se o elétron é uma onda, uma partícula ou ambas as coisas, o aluno B4 respondeu que: "Bem, ora ele vai se comportar como onda, ora como partícula, depende do caso. Por exemplo, ao passar pela fenda, ele se comporta como onda, ao tocar o filme se comporta como partícula; então ele vai ter comportamento dual". Já o aluno B7, respondeu: "Desde o início eu achava que o elétron era apenas uma partícula girando em torno do núcleo. Eu acredito na natureza dual também para o elétron". Diante dos relatos acima, notamos que os mesmos passaram a ter uma interpretação mais dualista-realista, mostrando que sabe diferenciar objetos clássicos dos quânticos, como o aluno B10 que apresentou ao longo de todo o processo uma confusão entre elétron e fóton, responde que: "Tipo assim... quando ocorre à difração o elétron é uma onda, não é? Mas, quando se encontra num determinado espaço determinado ele é uma partícula, como no anteparo do filme". Parece que esse aluno, conseguiu superar suas concepções iniciais, inclusive relatando sobre a natureza dual apresentada pelo elétron, neste experimento.

Uma parte importante da entrevista foi quando perguntamos aos alunos, individualmente, "Em que você pensou quando produziu o desenho da questão 2 do 2º encontro?". Tivemos várias respostas significantes, como a dada pelo aluno B3: "Na interferência de ondas, como a gente viu naquele experimento virtual, lembra? Formando interferências construtivas e destrutivas. Depois das fendas eles são ondas... interferem entre si; ao bater no filme aqui (mostrando o desenho), se comporta como partícula". Percebemos na fala de B3, que o mesmo passou a ter uma boa noção destes conceitos, quando utiliza um experimento abstrato, como o da fenda dupla.

Já o aluno B6, foi mais convincente quando respondeu: "Bem nessa figura aqui o que a gente observou foi que a frente de onda ao passar pelos orifícios A e B ela se difrata; ao difratar temos um comportamento ondulatório, ao passar pelos orifícios ele sofre interferência e posteriormente batem no negativo - filme gerando borrões ou franjas de interferência; bem foi nisso que pensei". Percebemos, através de sua resposta, que este aluno passou a descrever uma nova concepção, incorporou um novo construto, em que o elétron pode ser considerado como onda ou como partícula, ou seja, apresentando um comportamento dual.

Em outro momento, indagamos os alunos B5 e B8, como eles entendem a difração e interferência de elétrons? Suas respostas foram respectivamente: "Bem eu vou falar do meu histórico escolar a respeito do elétron; pois bem, eu tinha o elétron como uma partícula de certa forma indivisível, aquela que a gente estuda no ensino fundamental e médio. Quando eu entrei na universidade e posteriormente no nosso curso, eu identifiquei que tinha algo interessante e através do fenômeno da difração eu notei que um corpo não pode se difratar, se espalhar dessa maneira. Qual é a hipótese? Que ele seja uma onda. Pois bem, foi através da teoria ondulatória que eu entendi a difração. Posteriormente outro fenômeno também que ocorre nos elétrons é a interferência. As ondas de elétrons interferem com elas mesmas, como na experiência de Young, formando regiões claras e escuras. As escuras são interferências destrutivas (picos e vales) e claras são as construtivas (vales com vales)". E "No caso do experimento das fendas; a difração ocorre no momento em que ele é guiado pela onda e passa no orifício, certo? E a interferência dele vai ser por que se formam duas ondas após o orifício, uma vai sobrepor a outra e nesse momento ocorre a interferência". O aluno B5 possui uma visão mais ortodoxa para explicar o experimento paradigmático da fenda dupla, enquanto que o aluno B8 incorpora o dualismo realista de de Broglie, com sua onda-piloto.

Nessa ocasião a grande maioria apresentou uma interpretação mais voltada para a complementaridade, dando ao elétron um caráter ondulatório durante a difração e interferência, acrescentando um caráter corpuscular na detecção, na qual temos o colapso da função de onda. É importante também observarmos, que nenhum deles se referiu às posições dos máximos e mínimos proporcionados pela interferência dos

elétrons na tela, apesar de no questionário da confirmação/refutação (2ª aula), eles terem desenhado as faixas claras e escuras. Nesse caso, eles apresentaram uma concepção da existência das faixas, mas sem detalhar, de forma precisa, onde elas ocorreriam.

CONCLUSÕES

Inicialmente, este trabalho teve como objetivo específico averiguar e comparar se os alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em especial os que cursavam as disciplinas de FM e MQ, possuíam os mesmos tipos de concepções e dificuldades com relação a assuntos que tratavam da difração e interferência de objetos microscópicos, pois de acordo com a literatura isto já era esperado. O que constatamos, a partir da análise do pré-teste na fase da *antecipação*, que representa o momento em que eles começam a construir réplicas do assunto comentado pelo professor, foi que eles apresentavam as mesmas dificuldades, que puderam ser organizadas em quatro categorias:

- Aplicação mista de conceitos da Optica Geométrica e Optica Física na explicação dos fenômenos da difração e interferência luminosa.
- Independência entre os efeitos da difração e interferência luminosa e a largura da(s) fenda(s).
- Não-aplicação da dualidade onda-partícula a fótons e elétrons, nos fenômenos da difração e interferência, sendo considerados apenas como partículas.
- Falta de conhecimento, quase total, das interpretações da MQ.

Os resultados vistos acima são as principais conclusões iniciais a que esse estudo chegou, confirmando uma de nossas hipóteses assumida que apontava para a nossa revisão de literatura, ou seja, alunos de Mecânica Quântica (MQ) apresentam as mesmas concepções sobre difração de elétrons que alunos de Física Moderna (FM), apesar de seus estudos mais aprofundados sobre o assunto.

Com relação ao Ciclo da Experiência de Kelly, verificamos que a fase do *investimento* não provocou grandes mudanças nas concepções dos alunos, apesar de mais da metade ter declarado que leu o texto. Esse resultado, ocorrido num período em que os alunos estavam defendendo suas monografias e que, portanto, não dispunham de muito tempo

para realizar essa leitura, levou a constatar a persistência dos erros conceituais observados no pré-teste e a baixa eficiência do uso de textos para influenciar concepções de alunos.

Na terceira fase do Ciclo, na qual se dá o encontro com o evento, concluímos que a utilização de experimentos concretos e virtuais ativamente **trabalhados** pelos alunos mostrou ser relevante para o processo de mudança das concepções dos alunos, conforme resultados obtidos no pós-teste e na entrevista:

- Os alunos passaram a conceber a diferença entre fenômenos ondulatórios e corpusculares;
- Os alunos passaram a compreender os fenômenos da difração e interferência para uma onda qualquer, bem como para elétrons.
- A grande maioria passou a compreender a importância da largura da fenda para a ocorrência do fenômeno da difração luminosa.
- Todos eles passaram a associar uma interpretação para explicar o fenômeno da difração de elétrons, bem como a formação do seu padrão de interferência em telas.

Não foi nosso objetivo, neste trabalho, defender uma interpretação específica para a difração de elétrons, mas colocar a necessidade de debater as diversas interpretações, que envolvem um conjunto de aspectos conceituais fundamentais para a compreensão desse fenômeno. Tal situação é especialmente relevante em cursos de formação de professores, que precisam construir abordagens didáticas envolvendo essa pluralidade de interpretações.

Com relação ao uso do Corolário *da Experiência* e do Ciclo da Experiência Kellyana como suporte teórico para elaborar uma intervenção didática, consideramos que atendeu à expectativa de possibilitar mudanças nas concepções dos alunos de MQ, apesar da complexidade do tema pesquisado (difração de elétrons). Verificamos que facilitou a articulação entre diversas interpretações e possibilitou uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto.

De um modo geral, esperamos que os resultados deste estudo possam contribuir para a discussão sobre a reformulação de ensino do ensino de Mecânica Quântica nos cursos de formação de professores. Além disso, sugerimos outras pesquisas sobre a utilização do Ciclo da Experiência Kellyana, associado às estratégias didáticas, em outros assuntos da Mecânica Quântica.

REFERÊNCIAS

AGRA, J.T.N. **Ensino de mecânica quântica: uma interpretação de descrições de professores.** Tese de mestrado. IFUSP, São Paulo, 1994.

ALONSO & FINN. **Física: um curso universitário.** v. 2. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1972.

ALVARENGA, B; MÁXIMO, A. **Curso de física,** v. 3. São Paulo: Ed. Scipione, 2000.

AMBROSE, B. S; SHAFFER, P. S; STEINBERG, R. N; MCDERMOTT, L.C. **An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference.** American Journal of Physics, Woodbury, v. 67, n. 2, p. 146 - 155, feb. 1999.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico.** Ed. Contraponto, Rio de Janeiro, p. 9, 1996.

BASSALO, J. M. F. **Crônica da óptica clássica.** Cad. Cat. Ens. de Física, Florianópolis, 4(3): 140 - 150, dez. 1987.

BASSALO, J. M. F. **Crônica da óptica clássica.** Cad. Cat. Ens. de Física, Florianópolis, 6(1): 37 - 58, abr. 1989

BASSALO, J. M. F. **Nascimento da física (1901 - 1950).** Belém: EDUTPA, , 2000.

BASTOS, H.F.B.N. **Changing teachers' practice: towards a constructivist methodology of physics teaching.** Tese de doutorado, University of Surrey, Inglaterra, 1992.

BASTOS FILHO, J.B; SIQUEIRA, A. F. **O experimento da dupla fenda como exemplo de incognoscibilidade?** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 15, ds 1 a 4. São Paulo, 1993.

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

BEN-IOV, Y. **Convite à física.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996.

BRAZ JUNIOR, D. **Física moderna: tópicos para o ensino médio.** Campinas: Companhia da Escola, 2002.

CHAVES, A. S. **Física: ondas, relatividade e física quântica.** Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso Ed, 2001.

CLONINGER, C.S. **Teorias da personalidade.** São Paulo: Martins Fontes, 1999.
EISBERG, R. M; LERNE1~, L. S. **Física - fundamentos e aplicações** - São Paulo: McGral-Hill do Brasil, 1983.

EULER, M; HANSELMANN, M; WLLEP, A- **Students' views of modeis and concepts in modern physies.** Paper apresentado em At the Annual Meeting National Association for Research in Science Teaching. Boston, march, 1999, pA, Disponível em: www.phys.ksu.edu/perg/pMers/narst/9

FEYNMAN, R. **Física em seis lições.** 2.ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 1999.

FLETCHER, P. R; JOHNSTON, 1. 1); CRAW17ORD, K **Student difficulties in learning quantum mechanics.** International Journal of Science Education. London, v. 20, n. 4, p. 427 - 446, apr/may 1998.

FISCI1LER, H; LICHTFELDT, M. **Modern physics and students' conceptions.** International Journal of Science Education. v. 14, n. 2, p. 181 - 190, Berlim, 1992.

GRAF. **Física térmica, óptica.** v. 2. 5. ed. São Paulo: EDUSP, 2002.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. **Fundamentos da Física.** v. 11-2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976.

KELLEP, F. J; GETTYS, W. E; SKOVE, M. J. **Física**. v. 2. São Paulo: Makron Books, 1999.

KELLY, G. A. A brief introduction to personal construct theory. In BANNISTER, D. (ed): **Perspectives in personal construct theory**. London; Academic Press, pp. 1 - 29, 1970.

MASSHADI, A. **Students' conceptions of quantum physics**. In WELFORD, G et al (eds) *Research in Science Education in Europe*. London: The Falmer Press, p. 254 - 265, 1996.

MINGUET, P. A (org.): **A construção do conhecimento na educação** - Porto Alegre, RS: Artmed, 1998.

MISSIROLI, G. F. **Padrão real de interferência de elétrons**. *American Journal of Physics*, 44, n. 3, p. 306, 1970.

MONTENEGRO, R. L. **Interpretação da mecânica quântica e as concepções dos alunos do curso de física**. Tese de mestrado. IFUSP, São Paulo, 2000.

MONTENEGRO, R. L; PESSOA, O. **Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física**. *Investigações em Ensino de Ciências*, p. 1 - 20, disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol17/~2>>, 2002.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.

MOTA, L. M. **As controvérsias sobre a interpretação da Mecânica Quântica e a formação dos licenciados em física**. Tese de mestrado. USC, SC, 2000.

NUSSENZVEIG, H. M **Curso de física básica**. v. 4: ótica, relatividade e física quântica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. v. 2: fluidos, oscilações, ondas e calor: 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1981.

OLIVEIRA, M. M de. **Como fazer projetos, relatórios, monografias dissertações e teses**. Recife, Pe: Edições Bagaço, 2003.

OSADA, J. **Evolução das idéias da física**. São Paulo: Edgard Blücher, EDUSP, 1972.

OSTERMANN, F., MOREIRA, M. **A física na formação de professores do ensino fundamental**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1999.

OSTERMANN, F., RICCI, T. F. **Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica**: Um estudo na formação de Professores de Física. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 2, p. 235 -257, 2004.

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

PERVIN, L. A. **Personalidade**: teoria, avaliação e pesquisa: São Paulo - Ed. E.P.U, 1978.

PESSOA JUNIOR, O. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2003.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social**: métodos e técnicas. 3. ed. São Paulo: editora Atlas S.A, 1999.

RIVAL, M. **Os grandes experimentos científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

ROCHA, J. F. M (org). **Origens e evolução das idéias da física**. Salvador: EDUTBA, 2002.

RONAN, C. A. **história ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge**. vol 3. da Renascença à revolução científica: Rio de Janeiro, Rj: Jorge Zahar Ed, 2001.

ROSMORDUC, J. **De Tales a Einstein**: São Paulo - Editorial Caminho, 1983.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks** - Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1987.

SOLBES, J; CALATAYUI, M. L; CLIMENT, J. B; NAVARRO, J. **Errores conceptuales em los modelos atomicos cuanticos**. Ens. de las Ciencia, 189 - 195, 5(3), 1987.

YIN, Robert, K. **Estudo de casos: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bokinan, 2005

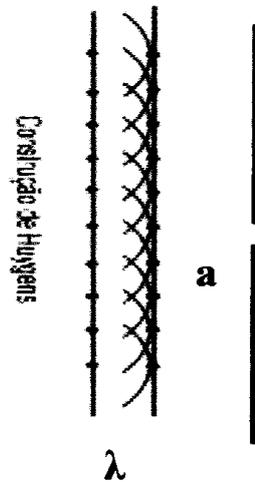
APÊNDICES

APÊNDICE A - PRÉ-TESTE

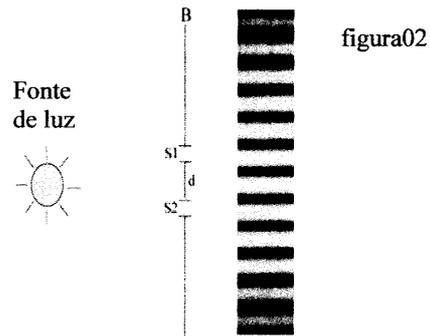
PRÉ-TESTE

1. Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira, no qual foi feita uma pequena fenda de abertura (a):

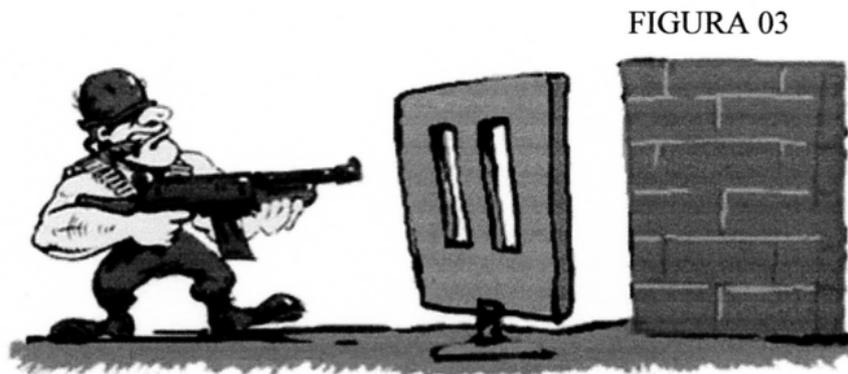
Figura 01



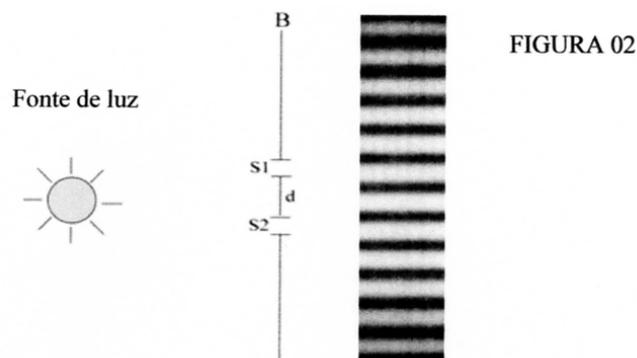
- b) Desenhe, após a fenda, a representação dessas ondas, usando a construção de Huygens.
 - c) Que tipo de fenômeno ocorreu após a passagem do feixe de luz através da fenda?
 - d) Qual a influência da largura (a) da fenda e o comprimento de onda da luz incidente sobre o fenômeno que ocorre após a passagem do feixe de luz através da fenda?
2. Na figura abaixo temos um feixe de luz monocromática incidindo sobre uma barreira com duas fendas de mesma abertura ($s_1 = s_2$), com uma distância d entre si ($d \leq \lambda$). Após a barreira existe um anteparo fixo.



- a) Após a passagem da luz através das fendas ocorrem dois fenômenos ópticos. Quais são eles?
- b) A que correspondem as regiões claras e escuras no anteparo?
- c) Se um feixe de partículas em movimento (metralhadora de partículas) fosse interceptado pelo obstáculo da figura 3 abaixo, o que veríamos no anteparo? Justifique. Qual a relação com o padrão da figura 2 ?



3. Nessas duas situações (figuras 1 e 2), a luz se comporta como partícula (como Newton pensava) ou uma onda (como Huygens e Yoting afirmavam) ? Justifique.



4. No final do século XIX, Hertz testou experimentalmente a natureza da luz, deduzida por Maxwell, como onda eletromagnética. No entanto, em 1905, Einstein explicou teoricamente o efeito fotoelétrico, constatado no próprio experimento por Hertz e posteriormente por Lenard, concluindo que a luz é formada por partículas, que ele chamou de fótons. Diante deste relato histórico, o que você diria sobre a natureza da luz? Justifique.
5. Um feixe de elétrons é disparado contra uma barreira, conforme a figura 04, passando por duas fendas de mesma abertura e formando os padrões mostrados na figura abaixo, sobre uma tela cintiladora, em que eles são detectados.

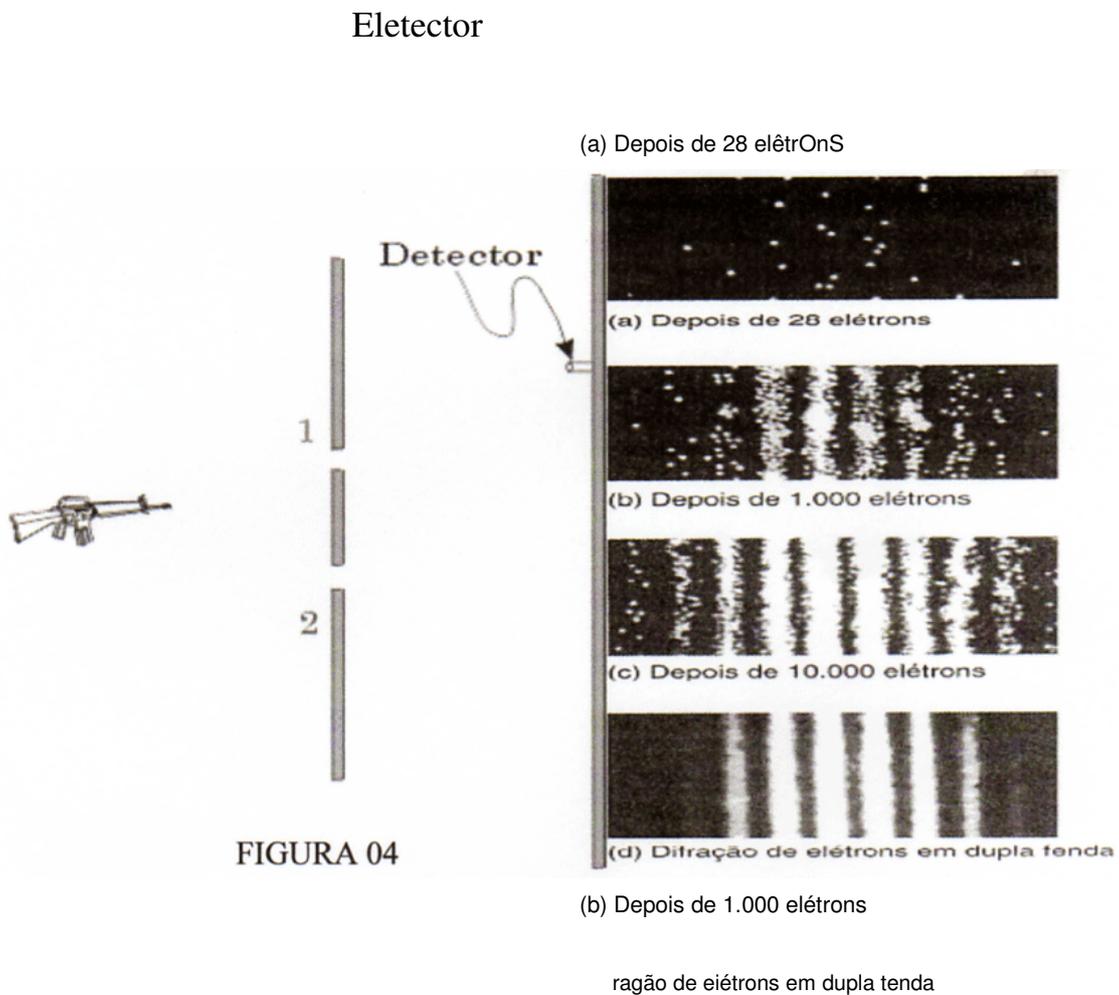


Figura 04

- a) Que padrão você espera obter com a passagem de apenas um elétron pelas duas fendas?

- b) Há como saber por onde o elétron passou?

APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO DE INVESTIMENTO

Nome do Aluno(a)

1. Você leu o texto?

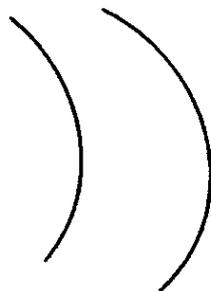
- TODO
 MAIS DA METADE
 MENOS DA METADE
 NÃO

2. Você consultou outras fontes, como o seu livro-texto, Internet, revistas, periódicos etc?

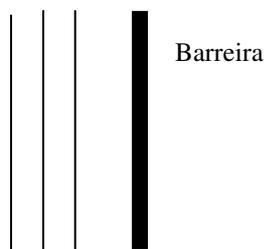
- SIM
 NÃO

OBS: SE VOCÊ LEU O TEXTO CONTINUE RESPONDENDO AS QUESTÕES SEGUINTE; CASO CONTRÁRIO DEVOLVA O QUESTIONÁRIO E OBRIGADO.

3. A partir da leitura do texto, como você desenharia a nova frente de onda da figura abaixo, baseando-se no princípio de Huygens?



4. Desenhe a onda no trecho após a barreira, considerando uma propagação para a direita.



Ondas Planas

5. É possível se obter uma difração, substituindo-se a onda incidente na fenda simples por um feixe de elétrons?

APÊNDICE C - PLANO DE AULA (10 ENCONTRO)

Objetivo:

Introduzir os aspectos conceituais, históricos e experimentais cientificamente corretos sobre a luz.

Conteúdos:

- No 1º momento, tivemos uma aula expositiva e participativa, na qual foram tratados teoricamente, assuntos que se referiam à formação de uma onda plana ou curva, a partir do modelo de Huygens.
- No 2º momento, tratamos dos fenômenos da difração e interferência da luz proposta por Young e a experiência do efeito fotoelétrico proposta por P. Lenard, com as respectivas hipóteses de Einstein para a sua explicação.
- No 3º momento, foi realizada uma parte experimental, na qual tivemos a utilização de molas helicoidais e cordas, para melhor esclarecer as características ondulatórias com seus respectivos fenômenos; o uso de uma cuba de onda, para demonstração da difração e interferência das ondas mecânicas na água, bem como a formação de ondas planas e curvas; o uso da luz do laser sobre um fio de cabelo (cílios, pena de ave) na demonstração da difração e interferência da luz; o uso de lâminas transparentes e retro projetor na demonstração da interferência da luz. Em todas as atividades experimentais concretas, os alunos tiveram participação, dentro de uma abordagem investigativa, explorando todos os conceitos envolvidos nos fenômenos. Tivemos ainda nessa aula, uma demonstração de uma experiência virtual sobre a difração e interferência da luz, em fenda simples e dupla, retirada do sítio (<http://www.falstad.com>). Para melhor compreensão sobre o efeito fotoelétrico, utilizamos um software disponível em JAVA, na Internet (<http://www.ehu.es/sbweb/fisica/euantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>). Nessa ocasião, oportunizamos aos alunos a utilização dos softwares, instigando-os a

explorar todas as possibilidades oferecidas por esses recursos, na tentativa de fazêlos compreender os conceitos teoricamente abordados em sala de aula.

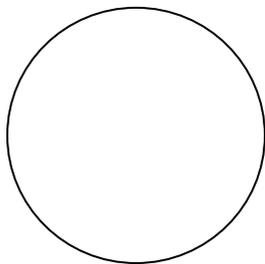
APENDICE D - QUESTIONARIO (1ª AULA)

Nome do aluno(a):

1. Dentre as características citadas a seguir, classifique-as de acordo com a sua concepção de **onda (O)** ou **partícula (P)**

- **Sofre interferência** ()
- **Transporta matéria e energia** ()
- **Transporta matéria** ()
- **Está localizada no espaço** ()
- **Sofre reflexão** ()
- **Sofre polarização** ()
- **Sofre refração** ()
- **Sofre difração** ()
- **Está espalhada no espaço** ()

2. Através do princípio de Huygens desenhe as ondas subsequentes nas figuras abaixo.

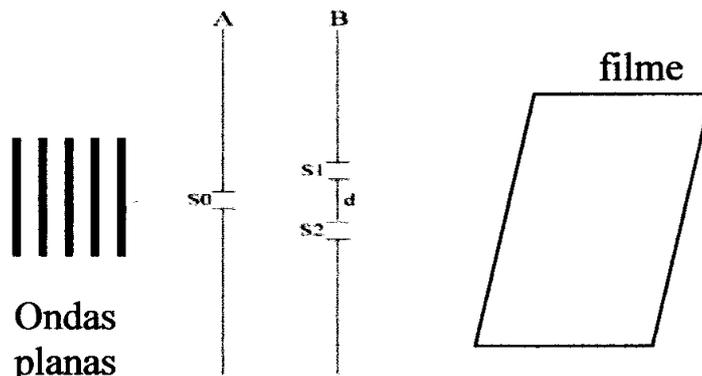


Ondas circulares



Ondas planas

3. A partir da figura abaixo desenhe as ondas produzidas após os orifícios, diga que fenômeno(s) ocorre e desenhe o que veremos no filme.



APÊNDICE E - PLANO DE AULA (2º ENCONTRO)

Objetivo:

Discutir as principais interpretações utilizadas, atualmente, na Mecânica Quântica.

Conteúdos:

Aspectos ondulatório e corpuscular das partículas; Interpretação ondulatória-realista; Interpretação corpuscular-realista; Interpretação dualista-realista; Interpretação dualista-positivista; Discussão do texto: Uma experiência com elétrons (FEYNMAN, 1999, p 179)

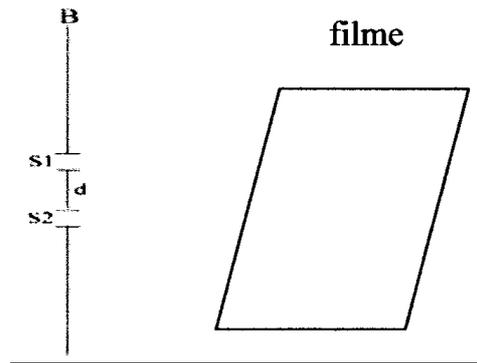
Experiência virtual ou bancada virtual utilizada para observação da difração em fenda dupla de elétrons, com a formação do padrão de interferência, tinha-se a possibilidade de se alterar a largura da fenda, o número e tipo de partículas emitidas (fótons ou elétrons), alterar a distância entre as fendas etc. Este software livre pode ser acessado através do endereço:

(<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html>)

APÊNDICE F - QUESTIONÁRIO (2º ENCONTRO)

Nome do aluno(a):

1. De acordo com a figura abaixo imagine um feixe de elétrons incidindo sobre o anteparo com fenda dupla. Que fenômeno(s) você espera acontecer? filme



2. O que veríamos na tela (filme) se lançássemos um feixe de elétrons sobre o anteparo com fenda dupla?
3. E se fosse só um elétron de cada vez?

APÊNDICE G - ARTIGO

INVESTIGANDO O USO DO CICLO DA EXPERIÊNCIA KELLYANA
NA
COMPREENSÃO DO CONCEITO DE DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS.

Marcos Antonio Barros
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB.
Campina Grande, PB.
Heloisa Flora B. N. Bastos.
Departamento de Educação - UFRPE
Recife, PE

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de verificar as mudanças que ocorrem nas concepções de licenciandos em física, sobre difração de elétrons, quando utilizam o Ciclo da Experiência Kellyana. As cinco etapas desse Ciclo (antecipação, investimento, encontro, confirmação/refutação e revisão construtiva) foram distribuídas em dez reuniões, com duração média de duas horas cada, durante as quais foram acompanhadas as concepções dos alunos, desde as iniciais, detectadas através de um pré-teste, até as concepções mantidas ao término da intervenção didática, através de um pós-teste e de uma entrevista- Foram investigados, inicialmente, cinco alunos de Física Moderna e dez de Mecânica Quântica, do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em Campina Grande, obtendo-se concepções sobre difração de elétrons semelhantes às descritas em pesquisas anteriores. As etapas posteriores do Ciclo da Experiência Kellyana. foram aplicadas apenas a sete alunos de Mecânica, Quântica, cujas concepções sofreram mudanças na direção de uma maior articulação entre as visões corpuscular e ondulatória da

matéria, o que possibilitou uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto.

Palavras chaves: Ciclo da Experiência Kellyana, concepções dos alunos, difração de elétrons.

Abstract

The objective of this work is to investigate the changes that occur with the conceptions of physics licentiate students, in relation to electron diffraction, when using Kelly's Cycle of Experience. The five steps of this cycle (anticipation, investment, meeting, confirmation/refutation and constructive review) were distributed during 10 meetings, with an average duration of two hours. During these meetings the students' conceptions were followed, starting with a pre-test and ending with the evaluation of the acquired conceptions, using a post-test and an interview. At first 15 students from Universidade Estadual da Paraíba (Campina Grande, Brazil) were investigated, 5 of them in Modern Physics and 10 in Quantum Mechanics. Their conceptions in electron diffraction were similar to those shown in previous surveys. The following steps of Kelly's Cycle of Experience were applied only to 7 students of Quantum Mechanics whose conceptions changed to a better understanding of the relationship between the mass and wave visions of matter. As a result, a deeper and less fragmented understanding of this subject was possible.

Keywords: Kelly's Cycle of Experience, students' conceptions, diffraction of electrons.

1. Introdução

Muitos pesquisadores, seguindo uma linha de investigação didática em nível universitário, têm constatado a existência de graves erros conceituais em variados

assuntos nas disciplinas de Mecânica Quântica e/ou Estrutura da Matéria (SOLBES et al, 1987, p. 189). Segundo esses pesquisadores, tais erros são decorrentes da falta de conhecimento, por parte dos professores, das concepções prévias de seus alunos, do não esclarecimento da ruptura entre a Física Clássica e a Física Moderna e do exagerado uso de expressões matemáticas, totalmente descontextualizadas, como nos revela a pesquisa de Agra (1994), mostrando que os professores se preocupam, durante a aprendizagem dessa teoria por parte de seus alunos, apenas com o formalismo matemático da Mecânica Quântica em resolução de problemas-padrão, sem vínculos com a realidade, deixando de fora a interpretação física do fenômeno analisado. Em se tratando de licenciandos em física, futuros professores, essas deficiências são manifestadas quando os mesmos são postos a prova para ensinar Física Moderna Contemporânea (FMC) no ensino médio; levando-os a não se sentirem preparados para ensinar essa disciplina e creditarem essa falta de preparo à pouca ou nenhuma ênfase dada pelas licenciaturas a essa área do ensino da física, que é mais instrumentalista (MOTA, 2000).

Em outro trabalho, Fletcher *et al* (1998) relatam que os conceitos fundamentais da Mecânica Quântica não são compreendidos pelos estudantes. Estes apresentam sérias

dificuldades para associá-los às experiências cotidianas e, por isso, o processo de mudança conceitual é lento. Segundo esses autores, essa persistência de erros conceituais na disciplina de Mecânica Quântica (MQ) é devida ao modelo didático utilizado habitualmente pelo professor e que também não leva em consideração as concepções prévias dos alunos, como Solbes *et al* (1987) concluíram.

É possível verificar uma semelhança nos conflitos apresentados na pesquisa anterior com a pesquisa realizada por Roberto Montenegro e Osvaldo Pessoa (2002), realizada com oito turmas de MQ do Instituto de Física da USP. Os alunos apresentam as mesmas dificuldades na abordagem corpuscular, quando se tenta explicar difração e padrões de interferência para elétrons. Nas entrevistas, estudantes "visualizam" os elétrons como "bolinhas se movimentando, não localizada, com difícil visualização de sua natureza ondulatória" (p.106). Percebe-se nessa concepção espontânea a forte presença da física clássica, devido ao fato da imagem corpuscular clássica ser muito forte no aluno que estuda Mecânica Quântica, ou seja, o aluno não consegue romper facilmente com a

Física Clássica, segundo Solbes *et al.* (1987). Em outra pesquisa, conduzida por Ambrose *et al.* (1999), sobre o comportamento da luz quando incidia sobre um anteparo com uma ou duas fendas (difração e interferência), foram constatadas várias concepções sobre fótons, das quais destacamos o desconhecimento dos fenômenos ondulatórios, em especial a difração e interferência luminosa.

Diante desses resultados, resolvemos inicialmente pesquisar as concepções desenvolvidas pelos alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) em Campina Grande, em relação ao comportamento apresentado por elétrons numa difração em fenda dupla, após cursarem as disciplinas da Física Moderna e Mecânica Quântica e compará-las com os resultados apresentados nessas pesquisas citadas anteriormente. Em seguida, resolvemos pesquisar possíveis mudanças conceituais, obtidas com o uso de uma intervenção didática baseada no *Corolário da Experiência* da Teoria dos Construtos Pessoais de G. Kelly (1970).

Teoria dos Construtos Pessoais (TCP)

A Teoria dos Construtos Pessoais desenvolvida por George Kelly foi publicada em 1955, baseada numa filosofia de construção do conhecimento, chamada por ele de *alternativismo construtivo*. De acordo com essa visão, as pessoas constroem modelos provisórios para compreenderem a si mesmas, os fenômenos ao seu redor, prever e controlar eventos futuros. Esses modelos racionais são avaliados por critérios pessoais e alterados de acordo com os resultados dessa avaliação (BASTOS, 1992).

"Todas as nossas interpretações do universo estão sujeitas à revisão ou substituição" (KELLY, 1970, p. 15).

As pessoas são livres para escolher como querem ver o mundo e seus comportamentos decorrem dessas escolhas; elas são responsáveis por suas idéias e por suas mudanças (BASTOS, 1992).

“O ser humano não se limita a viver no universo respondendo a seus estímulos, mas possui a capacidade de representá-lo; isto implica que o homem pode realizar representações ou construções diferentes/alternativas a respeito do

mesmo e modificá-lo, se está em desacordo com ele" (MINGUET, P. A, (org.), 1998, p. 150).

Kelly nos mostra ainda que exista um paralelo comum entre um cientista e uma pessoa (homem-cientista), quando os mesmos desenvolvem hipóteses sobre determinado evento, ou seja, assim como os cientistas, os indivíduos desenvolvem expectativas sobre as conseqüências de seu comportamento e as avaliam em termos de exatidão do que pretendia. Essas previsões eventuais podem ou não ser refutadas, ou seja, o que importa é o que ele faz com essas previsões (MOREIRA, 1999).

"Esse homem-cientista **empenhado desde** sempre na predição e no controle, na observação e análise do mundo, enfrenta esta tarefa através de pautas criadas por ele mesmo, que, constantemente, confronta com realidades do universo" (MINGUET, P. A, (org.), 1998, p. 15 1).

O cientista desenvolve conceitos para descrever e interpretar os eventos que lhe interessam. O conceito chave de Kelly para o homem, como cientista, é o construto. São características que o indivíduo usa ao categorizar acontecimentos e estabelecer um roteiro de comportamento, visualizadas como eixos que possuem pólos dicotômicos (PERVIN, 1978).

Ciclo da Experiência Kellyana

Uma pessoa chega à aprendizagem, segundo Kelly, quando ao longo das várias tentativas de lidar com o evento, ela muda sua estrutura cognitiva para compreender melhor suas experiências, semelhante ao cientista que utiliza o método experimental para ajustar suas teorias.

Essas construções pessoais são hipóteses de trabalho que se confrontam com as experiências; estão sujeitas a constante revisão e re colocação. Ao contrastar as previsões antecipatórias com os acontecimentos, produz-se uma evolução progressiva de tais previsões. A própria experiência, segundo Kelly, é considerada com sendo conformada por construções sucessivas de acontecimentos. O processo da aprendizagem das pessoas se desenvolve segundo o ciclo da experiência Kellyana, composto de cinco etapas, representadas através da figura abaixo.

Figura 14 – Ciclo da Experiência Kellyana



Fonte: CLONINGER, 1999, p. 427.

Antecipação - Nessa fase o aluno recebe o convite para participar de um determinado evento. O objetivo é fazer com que o aluno busque nas suas concepções, idéias relevantes para compreender esse evento. É o começo do processo de aprendizagem (BASTOS, 1992).

Investimento - Na segunda etapa do Ciclo da Experiência Kellyana a pessoa se prepara para participar ativamente do evento, que neste corresponde a uma discussão sobre a difração de elétrons, tendo contato com livros, artigos, pesquisas na Internet, anotações do caderno etc, buscando informações sobre o assunto, passando a ter um conhecimento diferente daquele que anteriormente possuía.

Encontro com o evento - Na terceira etapa tem-se o encontro com o evento. É nessa etapa que o professor apresenta um conjunto de conceitos teóricos, juntamente com uma série de experimentos envolvendo esses conceitos, utilizando diversos recursos didáticos, como quadro, data-show, retro-projetor, experimentos virtuais e concretos. O objetivo desta etapa é levar os alunos a refletirem sobre suas concepções, comparando-as com as cientificamente aceitas, analisando os diversos conflitos cognitivos que surgirem.

Confirmação ou refutação dos conhecimentos - Através do conflito cognitivo gerado no momento do encontro, o aluno é levado a refletir a respeito de suas concepções sobre difração de elétrons, confirmando-as ou não. Percebe-se, portanto, que à medida que o aluno vai interagindo com o assunto, no momento do encontro, dá-se também a sua validação, ou seja, ele é levado a rever ou não idéias anteriores, sempre através de comparação com as informações adquiridas antes e após os encontros.

Revisão construtiva - É o momento em que o aluno faz uma revisão de seus conhecimentos. O professor pode realizar várias, atividades, como entrevistas, debates, palestras, etc, que possibilitam essa revisão.

11. METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada em torno de uma intervenção didática que utilizava as cinco etapas do Ciclo da Experiência Kellyana, (antecipação, investimento, encontro, confirmação ou refutação e revisão construtiva) distribuídas em dez reuniões, com duração média de duas horas cada.

No dia seguinte à explicação de todo o processo de pesquisa, seguido do convite aos alunos, que constituiu a primeira parte da etapa de *antecipação*, foi aplicado um questionário (pré-teste, ver apêndice A) com o objetivo de buscar informações sobre as concepções dos alunos acerca da difração de elétrons.

Tivemos o cuidado de não influenciar as respostas dos alunos, citando, no nosso primeiro encontro-convite, que durou cerca de trinta minutos, apenas o tema, no intuito de gerar expectativas, para no outro dia ser aplicado o pré-teste, com cinco questões, respondidas durante um período de sessenta minutos. O pré-teste foi aplicado a 15 alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba - UEP13, assim distribuídos: 05 alunos de Física Moderna (FM) e 10 alunos de Mecânica Quântica (MQ). Nosso objetivo inicial foi diagnosticar a existência de erros conceituais, sobre a difração de elétrons, nas duas turmas. Em seguida, comparamos esses resultados com aqueles apresentados na literatura citada na introdução deste artigo, que concluem que alunos que cursaram essas disciplinas não compreendem os conceitos quânticos ali propostos, em especial difração e interferência em fenda dupla e *úMica* para a luz, dualidade onda-partícula, difi-dção e interferência em fenda dupla utilizando elétrons, limitando-se, em geral, a dominar o seu formalismo matemático.

O momento do *investimento* ocorreu no dia seguinte à aplicação do pré-teste, durando cerca de quarenta minutos. A partir deste momento, a pesquisa foi realizada com sete dentre os dez alunos da disciplina de Mecânica Quântica (MQ), que participaram da primeira etapa (houve três desistências). A razão pelo qual utilizamos os alunos de MQ foi ter constatado que apesar de seus estudos mais aprofundados nesse assunto, em relação aos alunos de Física Moderna (17M), eles apresentavam os mesmos erros conceituais em conceitos básicos da MQ, como os envolvidos no experimento da fenda dupla para um único elétron.

Nessa ocasião, os sete alunos de MQ receberam um texto que trata do processo de formação de ondas desde o Princípio de Huygens até as interpretações **de Einstein para** a luz, além das interpretações dadas pela MQ à difração de elétrons. Eles também foram incentivados a

buscar outras informações na Internet, livros, artigos e a realizar leituras diversas a respeito do tema a ser estudado. Os alunos ficaram à vontade para realizar suas pesquisas durante uma semana. Ao término desse período, tivemos outro encontro, durante o qual aplicamos outro questionário (ver apêndice B), com duração de cinquenta minutos.

As atividades realizadas na etapa do encontro com o evento, foram organizadas a partir da análise dos resultados do pré-teste, tendo começado na semana seguinte à aplicação do questionário do investimento. Foram distribuídas em duas aulas, com uma duração de cerca de duas horas cada, em semanas consecutivas. Cada uma dessas aulas foi seguida pela aplicação de um questionário no dia seguinte à sua realização. O objetivo principal dessas aulas era mostrar conceitualmente, historicamente e experimentalmente as diferenças entre fenômenos ondulatórios e corpusculares, dualidade onda-partícula, bem como a difração de elétrons.

Na 1ª aula expositiva (ver plano de aula no apêndice C) foram tratados, teoricamente, assuntos que se referiam à formação de uma onda plana ou curva, a partir do modelo de Huygens, os fenômenos da difração e interferência da luz proposta por Young e a experiência do efeito fotoelétrico proposta por P. Lenard, com as respectivas hipóteses de Einstein para a sua explicação. Em seguida, foi realizada uma parte experimental, na qual tivemos a utilização de molas helicoidais e cordas, para melhor esclarecer as características ondulatórias, com seus respectivos fenômenos, o uso de uma cuba de onda, para demonstração da difração e interferência das ondas mecânicas na água, bem como a formação de ondas planas e curvas, o uso da luz do laser sobre um fio de cabelo (cílios, pena de ave) na demonstração da difração e interferência da luz, o uso de lâminas transparentes e do retroprojetor na demonstração da interferência da luz.

Tivemos ainda nessa aula uma demonstração de uma experiência virtual sobre a difração e interferência da luz, em fenda simples e dupla, retirada do site: "<http://www.faistad.com>". Para melhor compreensão sobre o efeito fotoelétrico, utilizamos um software disponível Em JAVA, na Internet (<http://www.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>), que permite verificar que a energia cinética dos elétrons emitidos independe da intensidade da luz incidente, mostrando uma dependência dessa energia com a frequência da radiação incidente. No dia seguinte, aplicamos um questionário (ver apêndice D), chamado de questionário da confirmação/refutação (1ª aula), para identificar os novos construtos.

Na semana seguinte tivemos a 2ª aula (ver plano de aula no apêndice E). É importante ressaltar que no início dessa aula foram analisadas todas as dúvidas da aula anterior. Nesse momento foram evidenciados aspectos ondulatórios e corpusculares dos elétrons, de forma teórica e experimental (virtual), levando-se em conta quatro interpretações comumente utilizadas na MQ, por professores e alunos. Não houve, por nossa parte, nenhuma tomada

de posição em relação às interpretações dadas. Na experiência virtual ou bancada virtual utilizada para observação da difração em fenda dupla de elétrons, com a formação do padrão de interferência, tinha-se a possibilidade de se alterar a largura da fenda, o número e tipo de partículas emitidas (fótons ou elétrons) e a distância entre as fendas, permitindo que fossem explorados os aspectos ondulatório e corpuscular. Esse software livre pode ser acessado através do endereço:

["http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html"](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html). A necessidade de se utilizar esse experimento virtual está na própria natureza sofisticada do experimento, de difícil reprodução em laboratórios de ensino. Não tivemos a intenção de tornar simplista ou superficial a difração de elétrons, com o uso dessa tecnologia, mas de tornar acessíveis os conceitos físicos envolvidos na simulação dos experimentos virtuais, fugindo assim de uma abordagem mais tradicional, em que se enfatiza o formalismo matemático. No dia seguinte, aplicamos um questionário (ver apêndice F), chamado de questionário da confirmação/refutação (2ª aula), para identificar os novos construtos, validados nessa 2ª aula.

A etapa da confirmação/refutação ocorreu paralelamente ao encontro com o evento, pois à medida que realizávamos as aulas-encontro, no outro dia aplicávamos um questionário, que serviu como validação ou não das hipóteses construídas por eles, ou seja, nessa etapa, os alunos foram postos à prova com relação às suas concepções prévias e às novas concepções formadas a partir das informações recebidas durante as aulas.

A suposição fundamental de que as concepções dos alunos de MQ pudessem ser mudadas pelo Ciclo da Experiência Kellyana foi a base deste trabalho. Assim, a revisão construtiva consistiu de dois momentos. O primeiro foi a real~ do pós-teste, que ocorreu no dia seguinte à aplicação do questionário da confirmação/refutação (2ª aula), que coletou as novas concepções dos alunos após terem vivenciado todo o Ciclo da Experiência. Por último, tendo em vista as ambigüidades permitidas por questionários abertos, resolvemos elaborar algumas questões acerca da difração e interferência de elétrons e aplicá-las durante entrevistas dirigidas, com intuito de resgatar outras informações que talvez tenham escapado ou não foram detectadas pelo pós-teste.

111. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Análise dos dados do pré-teste

Os resultados da investigação realizada por Ambrose et al. (1999), em tomo da compreensão de estudantes universitários sobre óptica Física, mostram que frequentemente nesse nível, alunos de Física Moderna confundem aspectos da óptica Física com a óptica Geométrica, dificilmente abandonam a óptica Geométrica e terminam por juntar as duas,

sem perceber a diferença entre os modelos. Além disso, sua pesquisa revela que os alunos não possuem a idéia de interferência, além de confundir fótons com elétrons.

Encontramos resultados semelhantes aos dos pesquisadores citados, como por exemplo:

- Aplicação mista de conceitos da óptica Geométrica e óptica Física na explicação dos fenômenos da difração e interferência luminosa.
- Independência entre os efeitos da difração e interferência luminosa e a largura da(s) fenda(s).

Esses resultados aproximam-se do cotidiano dos alunos, que observam diversos fenômenos nos quais a luz se propaga em linha reta ao atravessar aberturas cujas dimensões são muito superiores à faixa de frequência da luz visível, conforme os resultados obtidos por Fletcher et al (1998).

Nossos resultados mostram ainda que, apesar de estarem cursando períodos diferentes, os alunos de Mecânica Quântica que já viram quase todos os conteúdos exigidos pelo Curso de Licenciatura em Física (programas nos anexos 1 e 2), em relação aos alunos de Física Moderna, apresentam os mesmos erros conceituais, evidenciando falta de um estudo mais detalhado **do fenômeno, do ponto de** vista histórico e experimental, como também nos revelam que os mesmos não tiveram uma boa base teórica em óptica Física na licenciatura, lembrando apenas de alguns aspectos vistos no ensino médio.

Essas mesmas dificuldades são encontradas com frequência em licenciados ou bacharéis em física (MONTENEGRO, 2000), quanto à interpretação desses novos paradigmas, bem como a forte resistência à mudança acompanhada de sérios erros conceituais. Essa interpretação está ligada a um ensino mais tradicional, como nos revela Agra (1994), no qual os professores limitam-se a trabalhar a Mecânica Quântica, sob a perspectiva do formalismo matemático, resolvendo problemas-padrão, sem vínculos com a realidade, e deixando de fora a interpretação física do fenômeno analisado.

Já no fenômeno da difração de elétrons, Masshadi (1996), em sua pesquisa com cinquenta e sete alunos do último nível secundário na Inglaterra, relata que 30% dos alunos conceituam o elétron como partícula e outros 60% como onda, durante o fenômeno da difração, e o restante apresenta uma relação dual para o fenômeno. Entre nós, os resultados mostram que poucos sabem identificar os fenômenos da difração e interferência, falam da dualidade onda partícula muito mais por "modismo", uma vez que ela é bastante utilizada em sala de aula por professores e quase desconhecem as interpretações usadas pela MQ. Assim, percebemos que as dificuldades dos alunos de FM e MQ podem ser organizadas em duas grandes categorias:

- Não-aplicação da dualidade onda-partícula a fótons e elétrons, nos fenômenos da difração e interferência, sendo considerados apenas como partículas.
- Desconhecimento quase que total das interpretações usuais da MQ.

Algumas dificuldades específicas identificadas nos alunos de MQ parecem ser mais graves do que nos alunos de FM, mostrando-nos que os mesmos não possuem uma estrutura conceitual consistente para interpretar a natureza e comportamento dos elétrons no experimento da dupla fenda, ou seja, eles cometem os mesmos erros conceituais, que cometiam com a luz, quando agora utilizam elétrons no experimento.

No caso do experimento da fenda dupla para elétrons o objeto quântico é o elétron ao invés do fóton, como nas questões anteriores do pré-teste, possuindo as mesmas características. Apesar de o experimento parecer incompreensível para alguns pesquisadores, segundo Bastos Filho *et al* (1993), esse experimento é compatível com o realizado para a luz, sendo, portanto, observados os fenômenos da interferência e difração, dando-lhe a ambos um caráter ondulatório. Além disso, os alunos pesquisados não relatam nada sobre as interpretações usadas na MQ, que dão sustentação teórica aos fenômenos citados, parecendo desconhecer ou não lembrar do vínculo existente.

Entendemos ser o experimento de Yotting da fenda dupla para a luz, no início do curso de FM, um importante aliado para uma discussão futura sobre interferência e difração de elétrons, podendo contribuir para a diminuição das distorções em suas concepções. Tal compreensão é compatível com a sugestão de Ostermann *et al* (2004) de utilizar a ótica Ondulatória como uma espécie de "porta de entrada" para a MQ, ao invés de, como tradicionalmente é feito, usar a Mecânica Clássica para desempenhar essa função.

Análise dos dados do pós-teste e entrevista

No pré-teste, os alunos de MQ tiveram dificuldades em entender fenômenos exclusivamente ondulatórios, usando uma interpretação corpuscular, como por exemplo, na difração da luz. Já no pós-teste, além de compreenderem que se tratava de um fenômeno ondulatório, acrescentaram ainda que a boa visualização da figura apresentada se dava por conta da relação entre o comprimento de onda da luz e a abertura da fenda. A maioria dos alunos de MQ, futuros professores, revelaram ser capazes de caracterizar os objetos quânticos e diferenciá-los dos clássicos, como, por exemplo, associando a detecção pontual aos objetos clássicos, e o caráter probabilístico aos quânticos; invocando as interpretações mais aceitas atualmente e a dualidade onda-partícula como aplicáveis apenas ao mundo quântico.

Em síntese, as respostas dadas ao pós-teste, como revisão construtiva, mostraram que houve mudanças nas concepções dos alunos, em relação ao pré-teste e que elas não ocorreram ao acaso, mas provavelmente como consequência da abordagem do Ciclo da Experiência Kellyana, uma vez que, quanto maior a quantidade de revisões realizadas de um mesmo evento, maior será a variação no sistema de construção do aluno (BASTOS, 1992).

Tendo em vista as ambigüidades permitidas por questionários abertos, resolvemos utilizar três questões acerca da difração e interferência de elétrons, para através de entrevistas individuais, aprofundar os aspectos que foram trabalhados no Ciclo da Experiência. Nesse caso, a grande maioria apresentou uma interpretação mais voltada para a complementaridade, dando ao elétron um caráter ondulatório durante a difração e interferência, acrescentando um caráter corpuscular na detecção, na qual temos o colapso da função de onda. É importante também observarmos, que nenhum deles se referiu às posições dos máximos e mínimos proporcionados pela interferência dos elétrons na tela, apesar de no questionário da confirmação/refutação (2ª aula), eles terem desenhado as faixas claras e escuras. Nesse caso, eles apresentaram uma concepção da existência das faixas, mas sem detalhar, de forma precisa, onde elas ocorreriam.

IV. CONCLUSÕES

Inicialmente, este trabalho teve como objetivo específico averiguar e comparar se os alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em especial os que cursavam as disciplinas de FM e MQ, possuíam os mesmos tipos de concepções e dificuldades com relação a assuntos que tratavam da difração e interferência de objetos microscópicos, pois de acordo com a literatura isto já era esperado. O que constatamos, a partir da análise do pré-teste na fase da *antecipação*, que representa o momento em que eles começam a construir réplicas do assunto comentado pelo professor, foi que eles apresentavam as mesmas dificuldades, que puderam ser organizadas em quatro categorias.

Assim, confirmamos nossa hipótese que alunos de Mecânica Quântica (MQ) apresentam as mesmas concepções sobre difração de elétrons que alunos de Física Moderna (FM), apesar de seus estudos mais aprofundados sobre o assunto.

Com relação ao Ciclo da Experiência de Kelly, verificamos que a fase do *investimento* não provocou grandes mudanças nas concepções dos alunos, apesar de mais da metade ter declarado que leu o texto. Esse resultado, ocorrido num período em que os alunos estavam defendendo suas monografias e que, portanto, não dispunham de muito tempo para realizar essa leitura, levou a constatar a persistência dos erros conceituais observados no pré-teste e a baixa eficiência do uso de textos para influenciar concepções de alunos.

Na terceira fase do Ciclo, na qual se dá o encontro com o evento, concluímos que a utilização de experimentos concretos e virtuais ativamente trabalhados pelos alunos mostrou ser relevante para o processo de mudança das concepções dos alunos, conforme resultados obtidos no pós-teste e na entrevista:

- Os alunos passaram a conceber a diferença entre fenômenos ondulatórios e corpusculares;

- Os alunos passaram a compreender os fenômenos da difração e interferência para uma onda qualquer, bem como para elétrons.
- A grande maioria passou a compreender a importância da largura da fenda para a ocorrência do fenômeno da difração luminosa.
- Todos eles passaram a associar uma interpretação para explicar o fenômeno da difração de elétrons, bem como a formação do seu padrão de interferência em telas.

Não foi nosso objetivo, neste trabalho, defender uma interpretação específica para a difração de elétrons, mas colocar a necessidade de debater as diversas interpretações, que envolvem um conjunto de aspectos conceituais fundamentais para a compreensão desse fenômeno. Tal situação é especialmente relevante em cursos de formação de professores, que precisam construir abordagens didáticas envolvendo essa pluralidade de interpretações.

Com relação ao uso do *Corolário da Experiência* e do Ciclo da Experiência Kellyana como suporte teórico para elaborar uma intervenção didática, consideramos que atendeu à expectativa de possibilitar mudanças nas concepções dos alunos de MQ, apesar da complexidade do tema pesquisado (difração de elétrons). Verificamos que facilitou a articulação entre diversas interpretações e possibilitou uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto.

De um modo geral, esperamos que os resultados deste estudo possam contribuir para a discussão sobre a reformulação de ensino do ensino de Mecânica, Quântica nos cursos de formação de professores.

Referências Bibliográficas

AGRA, J.T.N. **Ensino de mecânica quântica: uma interpretação de descrições de professores.** Tese de mestrado. IFUSP, São Paulo, 1994.

AMBROSE, B. S; SHAFFER, P. S; STEINBERG, R- N; MCDERMOTT, L.C. **An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference.** American Journal of Physics, Woodbury, v. 67, n. 2, p. 146 - 155, feb. 1999.

BASTOS, H.F.B.N. **Changing teachers' practice: towards a coa-ctivist methodology of physics teaching.** Tese de doutorado, University of Surrey, Inglaterra, 1992.

BASTOS FILHO, J.B SIQUEIRA, A. F. **O experimento da dupla f- como exemplo de incognoscibilidade?** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 15, n's 1 a 4. São Paulo, 1993.

CLONINGER, C.S. **Teorias da personalidade.** São Paulo: Martins Fontes, 1999.

EULER, M; HANSELMANN, M; M-CJLLEIZ, A **Studeats' views of modeis and concepts in modern physics.** Paper apresentado em At the Annual Mecting National Association for Research in Science Teaching. Boston, march, 1999, pA, Disponível em: www.phys.ksu.edu/per~/!pMers/narst/qm

FEYNMAN, R. **Física em seis lições.** 2.ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 1999.

FLETCHER, P. R; JOHNSTON, I. D; **CRAWFORD, & Student difficulties in learning quantum mechanics.** International Journal of Science Education. London, v. 20, n. 4, p. 427 - 446, apr/may 1998.

KELLY, G. A. A brief introduction. to personal construct theory. In BANNISTER, D. (ed): **Perspectives in personal construct theory.** London; Academic Press, pp. 1 - 29, 1970.

MASSHADI, A. **Students' conceptions of quantum physichs.** In WELFORD, G et al (eds) Research in Science Education in Europe. London: The Falmer Press, p. 254 - 265, 1986.

MINGUET, P. A (org.): **A construção do conhecimento na educação** - Porto Alegre, RS: Artmed, 1998.

MONTENEGRO, R. L. **Interpretação da mecânica quântica e as concepções dos alunos do curso de física**. Tese de mestrado. IFUSP, São Paulo, 2000.

MONTENEGRO, R. L; PESSOA, O. **Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física**. Investigações em Ensino de Ciências, p. 1 - 20, disponível em: <http://www.if.ufrps.br/public/ensino/vo17/n2>, 2002.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.

MOTA, L. M. As controvéncias sobre a interpretação da Mecânica Quântica e a formação dos licenciados em física. Tese de mestrado. UFSC, SC, 2000.

OSTERMANN, F; RICCI, T. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: Um estudo na formação de Professores de Física. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

PERVIN, L. A. *Personalidade: teoria, avaliação e pesquisa*: São Paulo - Ed. E.P.U, 1978.

SOLBES, J; CALATAYUD, M. L; CLIMENT, J. 13; NAVARRO, J. Errores conceptuales em los modelos atomicos cuanticos. *Ens. de las Ciencia*, 189 - 195, 5(3), 1987.

APÊNDICE H - NORMAS PARA PUBLICAÇÃO DE TRABALHOS NO CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA

1. Nome completo do(s) autor(es) e do(s) estabelecimento(s) onde trabalha(m), com seu(s) respectivo(s) endereço(s), em folha separada do corpo do artigo.
2. Original em três vias.
3. Apresentação de um resumo do respectivo artigo
4. Apresentação de um resumo em inglês (se possível).
5. Indicação de palavras-chave no idioma do artigo e, se possível, também em inglês.
6. Ilustrações bem nítidas.
7. Fotos em preto e branco.
8. Referências bibliográficas seguindo as normas da ABNT, ao final do texto.
9. O artigo deve ter, no máximo, 25 páginas (em tamanho 14 e, pelo menos, 18 pt).

ANEXOS

**ANEXO 1 - PROGRAMA DE
FÍSICA MODERNA DO CURSO
DE
LICENCIATURA
EM FÍSICA DA UEPB**

	Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. Centro de Ciências e Tecnologia. Departamento de Física Curso de Licenciatura em Física
	Componente Curricular: Física Moderna
	Código: 111506 Carga Horária Total: 132 h.
	Série: 4ª (diurno e noturno) Oferta: Anual Ano: 2004
	Professor(a): Edvaldo de Oliveira Alves

conhecimentos, elementos constituintes da Física Moderna, impulsionaram o conhecimento acerca da Ciência e da Tecnologia do século XX e modificaram a vida do homem

PLANO DE CURSO

1. Ementa

Teoria da relatividade Especial. Radiação e a origem da Teoria Quântica. A Quantização da Eletricidade, da Luz e da Energia. A Descoberta do Núcleo Atômico. O Átomo de Bohr. Propriedades Corpusculares da Radiação. Dualidade Onda-Partícula. Postulados de De Broglie. A versão de Schrödinger da Mecânica Quântica. Soluções da Equação de Schrödinger: partícula livre, poços de potenciais e o oscilador harmônico simples. O Átomo de Hidrogênio. Física Nuclear: Modelos nucleares, decaimento nuclear e reações nucleares. Partículas Elementares.

2. Objetivos

Objetivos Gerais:

- Apresentar de forma propedêutica, os conhecimentos sobre Teoria da Relativ~ e Teoria Quântica e como estes

- Apresentar o corpo fenomenológico e matemático para solucionar e prever vários problemas do ponto de vista da física moderna.
- Capacitar o aluno para abstrair, do ponto de vista físico e matemático, as novas concepções que este conhecimento comporta frente aos conhecimentos de Física CL,~, amplamente discutido.
- Discutir formas metodológicas para a introdução do conhecimento de Física Moderna no Ensino Médio.
- Criar uma nova visão para interpretação dos diversos fenômenos da natureza.
- Capacitar matematicamente, o aluno, para solucionar problemas físicos nas áreas de Física Relativística, Física Quântica e Física de Partículas.
- Mostrar as falhas apresentadas pela Física Clássica e o necessário surgimento da Física Moderna.

3. Conteúdo Programático

Unidade temática:

1. Introdução:

1. 10 que é Física Moderna?
- 1.2 Apresentação do curso de Física moderna.

2. Teoria da Relatividade:

2. 1. A transformação de Galileu e a mecânica clássica
- 2.2. A transformação de Galileu e a teoria eletromagnética
- 2.3. A experiência de Michelson - Morley
- 2.4. Os postulados de Einstein
- 2.5. Simultaneidade
- 2.6. Efeitos cinemáticos da relatividade
- 2.7. A transformação de Lorentz
- 2.8. Transformação de velocidade
- 2.9. Mecânica relativística
2. 10. Transformação do momento e da energia
- 2.11. Verificação experimental da teoria

3. Radiação térmica e a origem da teoria quântica:

3. 1. Radiação eletromagnética de cargas aceleradas
- 3.2. Emissão e absorção de radiação Por superfícies
- 3.3. Radiação do corpo negro

- 3.4. A lei de Wien
- 3.5. A teoria de Rayleigh- Jeans
- 3.6. A distribuição de probabilidades de Boltzmann
- 3.7. A teoria de Planck
- 3.8. Comentários sobre o postulado de Planck

4. Elétrons, e átomos

4. 1. A razão para os elétrons
- 4.2. A carga e a massa dos elétrons
- 4.3. A experiência de Bucherer
- 4.4. Efeito fotoelétrico (com experimento)
- 4.5. A teoria clássica e a teoria quântica do efeito fotoelétrico
- 4.6. O efeito Compton

A descoberta do núcleo atômico:

5. 1. Modelo de Thomson para o átomo
- 5.2. Espalhamento de partículas alfa
- 5.3. Predições do modelo de Thomson
- 5.4. Comparações com a experiência
- 5.5. O modelo de Rutherford para o átomo
- 5.6. Verificação experimental e a determinação de Z
- 5.7. O tamanho do núcleo

II Unidade temática:

6. A teoria de Bohr para a estrutura atômica:

- 6. 1. 0 espectro atômico
- 6.2. Os postulados de Bohr
- 6.3. A teoria de Bohr do átomo de um elétron
 - 6.4.. Correção para a massa nuclear finita
 - 6.5. Estados de energia do átomo
 - 6.6. As regras de quantização de Wilson -Sommerfeld
 - 6.7. A teoria relativística de Sommerfeld
 - 6.8. O princípio da correspondência

7. Partículas e ondas:

- 7.1. Os postulados de de Broglie
- 7.2. Algumas propriedades das ondas piloto
- 7.3. Confirmação experimental dos postulados de de Broglie.
- 7.4. Interpretação da regra de quantificação
- 7.5.0 princípio da incerteza

8. Versão de Schrödinger da Mecânica Quântica:

- 8.1. A equação de Schrödinger
- 8.2. Interpretação da função da onda
- 8.3. A equação de Schrödinger independente do tempo
- 8.4. Quantização da energia na teoria de Schrödinger

- 8.5. Propriedades matemáticas da função de onda e auto funções

8.6. Teoria clássica de ondas transversais numa corda esticada

8.7. Valores esperados e operadores diferenciais

8.8. O limite clássico da mecânica quântica.

III Unidade Temática

9. Soluções da equação de Schrödinger

- 9.1. A partícula livre
- 9.2. Potenciais do tipo degrau
- 9.3. Barreiras de potencial
- 9.4. Poços de potenciais
- 9.5. Oscilador Harmônico simples

10. O átomo de um só elétron

- 10.1. Mecânica quântica para muitas dimensões e muitas partículas de Bohr
- 10.2. O átomo com um elétron
- 10.3. Separação e solução da equação do movimento relativo
- 10.4. Números quânticos, autovalores e degenerescência
- 10.5. Operadores do momento angular
- 10.6. Equação dos autovalores
- 10.7. Momento angular das auto funções de átomos com um só elétron

IV Unidade Temática

11. Física nuclear

11.1 A descoberta do nêutron

11.2. Propriedades dos núcleos no estado fundamental

11.3. Radioatividade

11.4. Reações nucleares

11.5. Fissão, Fusão e reatores nucleares

11.6. Interações de partículas com a matéria

11.7. A detecção de partículas

12. Partículas elementares

12.1. O positron e outras antipartículas

12.2. A descoberta do neutrino

12.3. Os mésons

12.4. Partículas ressonantes

12.5. A via Óctupla e os quarks

4. Metodologia

4.1. Estratégias de Ensino: Partindo-se de algumas situações -problema, utilizar-se-á, como instrumentos metodológicos, aulas expositivas, seminários, vídeos, leitura de textos científicos e de divulgação científica, bem como construção de experimentos, visitas a laboratórios e discussões em grupo, para construir o corpo básico de conhecimentos sobre Mecânica Quântica.

4.2. Recursos Técnico-Pedagógicos: Quadro e giz; textos de revistas científicas; visitas ao laboratório de Física Moderna da UFP13, vídeos e TV.

4.3. Avaliação: Será realizada de forma contínua utilizando-se os seguintes instrumentos: listas de exercícios, exercícios de avaliação escritos, relatórios e seminários.

S. Referências Bibliográficas

BARBOSA, A. F. **Técnicas de detecção.** Rio de Janeiro -RJ. C13PF. 1998. (apostila)

BEISER, A. **Concepts of Modern Physics.** 5th ed. New York - USA. McGraw Hill. 1995. 534p.

BORN, M. **Física atômica.** 4.ed. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian.

CONSTANTI, F.J. **Introdução à física Moderna.** Rio de Janeiro-RJ. Campus, 1981. 288p.

EISBERG, R. e RESNICK, R. **Introdução a Física Quântica.** 8.ed. Rio de Janeiro-RJ. Campus. 1994. 928p.

EISBERG1, R. M. **Fundamentos da Física Moderna.** Rio de Janeiro-RJ. Guanabara Dois. 1979. 643p.

ENDLER, A. M. F. Introdução à Física de Partículas. Rio de Janeiro-RJ. C13PF. 1998.191p.

GILBERT, A. Origens históricas da Física Moderna: introdução abreviada. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian.

LORENTZ, H. A., EINSTEIN, A. e MINKOWSKI, H. 0 princípio da Relatividade. vol.I. 4.ed. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian. 1986.

¹ Este livro é indicado como livro texto.

MENZEL, D. H. Mathematical Physics. New York - USA. Dover. 1961.

ORTOLI, S. e PHARABOD, J. P. Introdução à Física Quântica. Lisboa, Portugal. 1986.

RUSSEL, B. ABC, da relatividade. 5.ed. Rio de Janeiro-RJ. Zahar. 1985

SPIEGEL, M. R. Manual de fórmulas, métodos o tabelas de matemática. 2.ed. São Paulo - SP. Makron Books. 1992.

SQUIRES, GI. Problems in quantum Mechanics with solutions. Great Britain. 1995. 254p.

TIPLER ² P. A. Física Moderna. Rio de Janeiro- RJ. 1981. 423p.

TORRES. J. C. Einstein relativamente fácil. Rio de Janeiro-RJ. Gryphus. 1996. 134p.

² Este livro é indicado como livro texto

**ANEXO 2 - PROGRAMA DE MECÂNICA QUANTICA DO
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA DA UEPII**

	Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
	Centro de Ciências e Tecnologia
	Departamento de Física
	Curso de Licenciatura em Física
	Componente Curricular: Mecânica Quântica
	Código: 111523 Carga Horária Total: 66 h
	Série: 4a diurno e Sa noturno Oferta: semestral Ano: 2001
	Professor(a): Alex da Silva

PLANO DE CURSO

1. Ementa Equações de Onda de Schrodinger: Autofunções e Autovalores; Potenciais Unidimensionais; A Estrutura Geral da Mecânica Quântica; Métodos de Operadores em Mecânica Quântica; Equação de Schrodinger em Três Dimensões; Momento Angular; A Equação Radial; O Átomo de Hidrogénio.

2. Objetivos

Pretende-se que ao final do curso o aluno seja capaz de escrever a equação de Schrodinger dependente e independente do tempo para o problema de poço quadrado irrfinito e discutir como aparece a quantização de energia, seja capaz de discutir o significado dos termos: número quântico, estado fundamental, estado estacionário, valor esperado, elemento de matriz, regra de seleção de generecência e princípio de exclusão. Também seja capaz de discutir as similares e diferenças entre o modelo de Bolir e o tratamento da equação de Schrodinger para o átomo de hidrogénio.

3. Conteúdo Programático

1 Unidade Temática

A equação de onda de Schrodinger.

A equação da partícula livre. A interpretação probabilística. A conservação de fluxo. Valores esperados. O operador momento. A realidade dos valores esperados. A equação de uma partícula em um potencial.

Auto funções e Autovalores

A equação de autovalores da energia. A partícula em uma caixa: Autofunções e Autovalores: Ortogonalidade de autofunções ; o postulado de expansão e a interpretação dos coeficientes de expansão. Paridade. Autofunções do momento; estados não normalizáveis ; degenerescência e autofunções simultâneas.

Potência Unidimensionais

O potencial degrau; coeficientes de reflexão e de transmissão. O poço de potencial e estados ligados. A barreira de potencial; tunelamento; emissão fria; tunelamento através de películas finas; decaimento alfa. Modelos unidimensionais de moléculas e o potencial função de onda. O modelo de Kronig -penney. O oscilador harmônico.

A estrutura geral da Mecânica Quântica.

Autofunções e o teorema de expansão; analogia com espaços vetoriais. Operadores lineares; Operadores Hermitianos; completeza; degenerescência; conjuntos completos de observáveis que comutam. As relações de incerteza. O limite clássico da Teoria Quântica.

Métodos de Operadores em Mecânica Quântica.

O problema de oscilador harmônico; levantamento e abaixamento de operadores; auto-estados e autovalores. A interpretação da função de onda como amplitude de probabilidade. O desenvolvimento temporal de um sistema em termos de operadores; as descrições de Schrodinger e de Heisenberg.

11 Unidade Temática

8 equação de Schrodinger em Três Dimensões.

Separação do movimento do centro de massa; invariância por rotações; a separação do momento angular. A equação radial. A energia de Fermi para a caixa tridimensional.

Momento angular A expressão de L^2 ; método algébrico de resolver problema de autovalores, de L_x , e de L_z ; De levantamento e de abaixamento; funções de Legendre.

, ~ equação radial Comportamento na origem; comportamento para r grande. A partícula livre; funções de Bessel esférica; ondas esféricas incidentes e emergentes; deslocamentos de fase. O poço quadrado: estados líquidos; poços profundos; estrutura de camadas; soluções do contínuo.

O Átomo de Hidrogênio

Simplificação da equação radial. Números quânticos; degenerescência. Funções de onda e relações com as 'órbitas'

4. Metodologia

4.1. Estratégias de Ensino:

4.2. Recursos Técnico-Pedagógicos: O processo de ensinoaprendizagem da Mecânica Quântica dar-se-á utilizando-se de expressão oral sobre os assuntos do programa, abordagens teóricas, demonstrativas, com distribuição de listas de exercícios e resolução de exercícios em sala de aula.

4.3. Avaliação:

S. Referências Bibliográficas

GASIOROWICZ, S.; 1979. *Física Quântica*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro. EISBERG, R. e RESNICK, R. 1988. *Física Quântica*. Ed. Campos. Rio de Janeiro.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)