

---

## INVESTIGANDO O USO DO CICLO DA EXPERIÊNCIA KELLYANA NA COMPREENSÃO DO CONCEITO DE DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS<sup>+</sup>\*

---

*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 ou desconfirmação 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*

---

<sup>+</sup> Investigating the use of Kelly's Cycle of Experience to understand the concept of electron diffraction

\* *Recebido: abril de 2006.*

*Aceito: agosto de 2006.*

*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 changes that occur on Physics licentiate students' conceptions about electron diffraction, when engaged in a Kelly's Cycle of Experience. The five steps of this Cycle (anticipation, investment, encounter, confirmation or disconfirmation and constructive revision) were distributed during ten meetings, with an average duration of two hours each. During these meetings students' conceptions were identified, initially through a pre-test and finally through a post-test and an interview. Fifteen students, following Modern Physics and Quantum Mechanic courses at Universidade Estadual da Paraíba, were investigated at the beginning of the research. Their conceptions about electron diffraction were similar to those described in previous researches. The following steps of Kelly's Cycle of Experience were applied only to seven students of Quantum Mechanics whose conceptions changed towards a better articulation between corpuscular and wave nature of matter. As a result, a deeper and less fragmented understanding of this subject was possible.*

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

## **I. 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 decor-

rentes 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 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 (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, 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 Uni-

versidade Estadual da Paraíba (UEPB) em Campina Grande, em relação ao comportamento apresentado por elétrons numa difração em fenda dupla, após cursarem as disciplinas 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).

## II. 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* (GARGALLO; CÁNOVAS, 1998, p. 150).

Kelly nos mostra ainda que existe 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 pretendiam. 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 (GARGALLO; CÁNOVAS, 1998, p. 151).*

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).

### **III. 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 de aprendizagem das pessoas ocorre segundo o Ciclo da Experiência Kellyana, composto de cinco etapas, representadas na Fig. 1.

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. Nesta pesquisa corresponde a uma discussão sobre a difração de elétrons, tendo contato com livros, artigos, pesquisas na Internet, anotações do caderno, 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.

#### Ciclo da Experiência Kellyana



Fonte: CLONINGER, 1999, p. 427.

Fig. 1

Confirmação ou desconfirmação 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 durante 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, que possibilitam essa revisão.

#### IV. 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 desconfirmação 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 - 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 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 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.

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 (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 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. No dia seguinte, a cada uma dessas aulas foi aplicado um questionário. 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.

Nessa aula também foi apresentada uma experiência virtual sobre difração e interferência da luz, que permitiu 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 alterar a largura da fenda, o número e tipo de partículas emitidas (fótons ou elétrons) e a distância entre as fendas, per-



mitindo que fossem explorados os aspectos ondulatório e corpuscular. Esse software livre pode ser acessado através do endereço:

<<http://www.physik.unimuenchen.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/desconfirmação (2ª aula), para identificar os novos construtos, validados nessa 2ª aula.

A etapa da confirmação/desconfirmação ocorreu paralelamente ao encontro com o evento, pois à medida que realizávamos as aulas-encontro, no outro dia aplicávamos um questionário, que servia 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 realização do pós-teste, que ocorreu no dia seguinte à aplicação do questionário da confirmação/desconfirmação (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.

## **V. Análise e discussão dos dados**

### **Análise dos dados do pré-teste**

Os resultados da investigação realizada por Ambrose et al. (1999), em torno 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 se limitam 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, perce-

bemos 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 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.

### **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, que faz parte da **fase da antecipação** do Ciclo da Experiência Kellyana. 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, históricos 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**.

O intuito desse questionário foi de verificar se os alunos tinham lido o texto e comparar suas concepções com aquelas detectadas no pré-teste. A maioria dos alunos (57,1%) afirmou ter lido o texto, acompanhado de 28,6% que afirmaram ter lido mais da metade e apenas um aluno 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. 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.

#### **Questionário confirmação/desconfirmação (1ª aula)**

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 dizem Ostermann et al, (2004, p. 12), “a porta de entrada da MQ”.

#### **Questionário confirmação/desconfirmação (2ª aula)**

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 várias respostas dadas ao segundo questionário, que são possíveis representações esquemáticas, oriundas da forma como eles interagiram com o assunto, associando-as às interpretações discutidas em sala, 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.

#### **Análise dos dados do pós-teste e entrevista (fase da revisão construtiva)**

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 entrevistas individuais para, através de três questões acerca da difração e interferência de elétrons, 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, que era acrescido de 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) terem desenhado as faixas claras e escuras. Eles apresentaram uma concepção da existência das faixas sem, no entanto, detalhar de forma precisa onde elas ocorreriam.

## VI. 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. Esse resultado pode ser devido ao pouco tempo disponível para realizar as leituras, assim como à falta de competências associadas à leitura e interpretação de textos, o que indica a necessidade de maiores investigações.

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 atenderam à expectativa, indicando tipos de atividades que possibilitaram mudanças nas concepções dos alunos de MQ, apesar da complexidade do tema pesquisado (difração de elétrons). Verificamos também que a orientação para a articulação entre diversas interpretações 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 do ensino de Mecânica Quântica nos cursos de formação de professores.

## Referências

AGRA, J. T. N. **Ensino de mecânica quântica: uma interpretação de descrições de professores.** 1984. Dissertação (Mestrado) – IFUSP, São Paulo.

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 constructivist methodology of physics teaching.** 1992. Tese (Doutorado) – University of Surrey, Inglaterra.

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

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

EULER, M.; HANSELMANN, M.; MÜLLER, A. Students' views of models and concepts in modern physics. In: THE ANNUAL MEETING NATIONAL ASSO-

CIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING, 1999, Boston. Disponível em: <[www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst/qm](http://www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst/qm)>

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

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

GARGALLO, B.; CÁNOVAS, P. A construção humana através da elaboração das construções pessoais: G. A. Kelly. In: MINGUET, P. A. (Org.). **A construção do conhecimento na educação**. Porto Alegre: Artmed, 1998. p. 150-173.

KELLY, G. A. **A theory of personality: The psychology of personal constructs**. New York: The Norton Library, 1963.

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

MONTENEGRO, R. L. **Interpretação da mecânica quântica e as concepções dos alunos do curso de Física**. 2000. Dissertação (Mestrado) - IFUSP, São Paulo.

MONTENEGRO, R. L.; PESSOA, O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n2>>

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**. 2000. Dissertação (Mestrado) - UFSC, SC.

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. B.; NAVARRO, J. Errores conceptuales em los modelos atomicos cuanticos. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 5, n. 3, p. 189-195, 1987.

### Bibliografia consultada

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão de literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica introdutória. **Revista Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, mar. 2001.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Revista Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, mar. 2000.

### Apêndice A

#### 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):

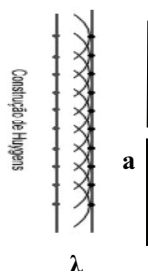


Fig. 1

- Desenhe, após a fenda, a representação dessas ondas, usando a construção de Huygens.
- Que tipo de fenômeno ocorreu após a passagem do feixe de luz através da fenda?

c) 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.

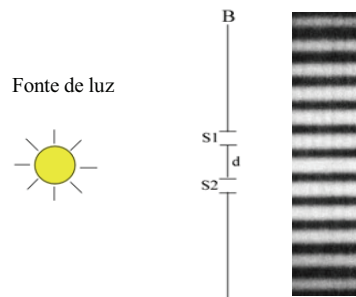


Fig. 2

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 Fig. 3, o que veríamos no anteparo? Justifique. Qual a relação com o padrão da Fig. 2?

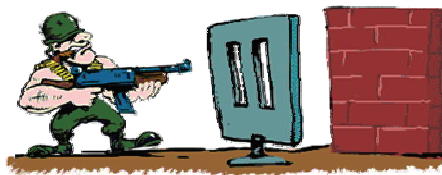


Fig. 3

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

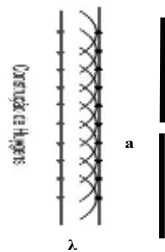


Fig. 1

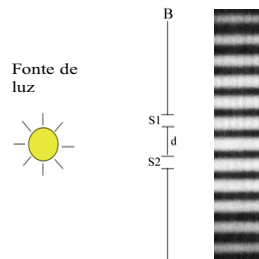


Fig. 2

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.

5. Um feixe de elétrons é disparado contra uma barreira, conforme a Fig. 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.

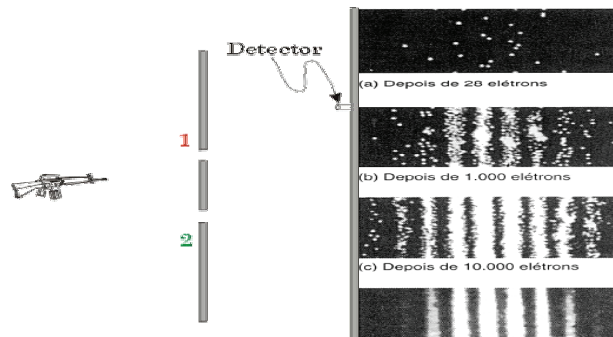


Fig. 4

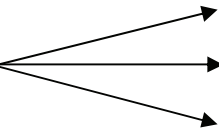
a) Que padrão você espera obter com a passagem de apenas um elétron pelas duas fendas?

b) Há como saber por onde o elétron passou?

## Apêndice B – Questionário de Investimento

Nome do Aluno(a) .....

1. Você leu o texto?

- SIM 
  - TODO
  - MAIS DA METADE
  - MENOS DA METADE
- NÃO

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

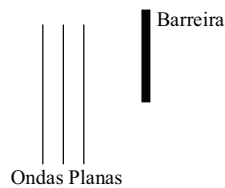
- SIM
- NÃO

**Obs: Se você leu o texto continue respondendo as questões seguintes; 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.



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 (1º 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 retroprojeter 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 site <<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/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 fazê-los compreender os conceitos teoricamente abordados em sala de aula.

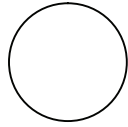
### Apêndice D – Questionário (1ª Aula)

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 ( )
- 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 subseqüentes nas figuras abaixo.

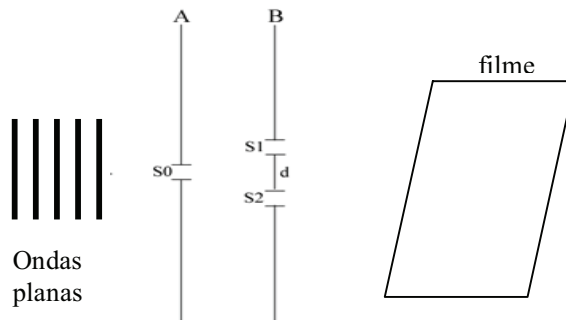


Ondas circulares



Ondas planas

3. A partir da figura a seguir, 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)**

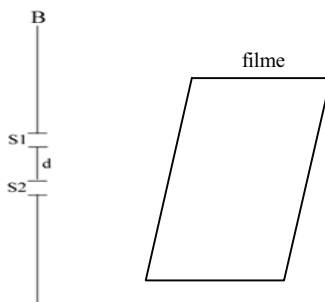
Experiência virtual ou bancada virtual utilizada para observação da difração em fenda dupla de elétrons, com a formação do padrão de interferência, tinha-se a possibilidade de se alterar a largura da fenda, o número e tipo de partículas emitidas (fótons ou elétrons), alterar a distância entre as fendas 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?



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?