

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

**INSERÇÃO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: UMA
PROPOSTA PARA PROFESSORES**

MÁRCIA CÂNDIDA MONTANO WEBBER



PORTO ALEGRE

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

**INSERÇÃO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: UMA
PROPOSTA PARA PROFESSORES¹**

MÁRCIA CÂNDIDA MONTANO WEBBER

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Dr.
Trieste Freire Ricci, apresentada ao Instituto de
Física da UFRGS em preenchimento parcial aos
requisitos para a obtenção do grau de Mestre em
Ensino de Física.

Porto Alegre

2006

¹ Trabalho parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Dedico este trabalho à minha filha Monique, que por tantos dias foi privada da minha companhia, para que, no futuro, perceba essa postura de busca pelo conhecimento e de prazer por estudar como um modelo de vida a ser seguido!

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

- ao meu marido Cláudio, grande companheiro, o meu agradecimento especial por ter aceitado minhas ausências, compartilhado das minhas angústias e ter sonhado comigo a realização concreta do curso;
- a Hisolda e Osvaldo, pais maravilhosos, que não mediram esforços para me proporcionar uma boa educação e me ensinaram a lutar com garra e persistência na busca de um ideal;
- ao meu orientador, Prof. Dr. Trieste Freire Ricci, pela incansável orientação dedicada a este estudo;
- aos colegas e professores do curso, pelo apoio, incentivo e amizade durante a realização desta caminhada;
- à coordenação do Instituto de Física da Universidade de Passo Fundo, por cederem as dependências para realização do curso, em especial, à professora Cleci Werner da Rosa pelo constante apoio;
- aos alunos do V nível do curso de Física da Universidade de Passo Fundo, pelo carinho e pela participação intensa nesta experiência didática.

RESUMO

Este trabalho apresenta a elaboração, aplicação em sala de aula e os resultados da proposta de um curso introdutório à mecânica quântica para futuros professores de ensino médio. O curso foi aplicado na Universidade de Passo Fundo como parte de uma disciplina do curso de licenciatura em Física. A proposta tem como marco teórico a teoria cognitiva de Piaget. O curso desenvolvido faz uso sistemático de novas tecnologias de comunicação, com destaque para o *software* Doppelspalt, utilizado para promover o aprendizado significativo de alguns dos conceitos mais básicos da mecânica quântica. Como produto educacional, foi produzido material instrucional que compreende o texto completo envolvendo os conteúdos abordados e os roteiros exploratórios elaborados e usados em atividades virtuais. Com a elaboração do curso, espera-se facilitar a inserção da mecânica quântica no ensino médio, através de um produto educacional testado e adequado à realidade do ensino oferecido aos futuros professores. A proposta leva em conta, também, as recomendações dos Parâmetros Curriculares Nacionais, no sentido de uma progressiva inserção da física do século XX no ensino médio.

Palavras-chave: Física, Mecânica Quântica, Ensino Médio, Novas Tecnologias de Comunicação.

ABSTRACT

This work presents the writing production, the application in classroom and the results of the proposal of an introductory course to the quantum mechanics for the future teachers of high school. The course was applied in Universidade de Passo Fundo as part of subject of the Physics Graduation Course. The proposal has as theoretical base Piaget's Cognitive Theory. This course does systematical use of new communication techniques, it points out the *software* Doppelspalt, used to promote the effective learning of some basics concepts of the quantum mechanics. As product of this work, was made instructional material as the complete text that involves the studied contents and the exploratory itineraries produced and used in virtual activities. The writing production of this course intends to become easier the insertion of the quantum mechanics into the high school, through of tasted educational product that is suitable to reality of the offered teaching for future teachers. The proposal has in mind also the advices of Parâmetros Curriculares Nacionais, in the sense of a progressive insertion of XX century Physics Subject to high school.

Keywords: Physics, Quantum Mechanics, High school, New Communication Technologies

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Acima o pórtico da entrada principal da universidade. Abaixo a entrada do ICEG.

Figura 2: Laboratório de Física Aplicada.

Figura 3: Laboratório de Eletricidade e Magnetismo.

Figura 4: Laboratório de Preparação.

Figura 5: Laboratório de Ótica.

Figura 6: Laboratório de Mecânica.

Figura 7: Laboratório de Ferramenta e Preparação.

Figura 8: Laboratório de Informática.

Figura 9: Alunos do V nível do curso de Física da UPF.

Figura 10: Experimento de Young com partículas clássicas.

Figura 11: Experimento de Young com elétrons.

Figura 12: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 1.

Figura 13: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 2.

Figura 14: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 3.

Figura 15: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 4.

Figura 16: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 5.

Figura 17: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 6.

SUMÁRIO

1. Introdução	8
2. Estudos relacionados.....	14
2.1. Viabilidade de inserção da física moderna no ensino médio.....	14
2.2. Algumas propostas de estratégias didáticas para a inserção da física moderna no ensino médio	18
3. Fundamentação Teórica	23
4. Metodologia	39
4.1. Contexto da aplicação da proposta.....	39
4.2. A elaboração do material instrucional.....	43
4.3. Relato da implementação do material instrucional	44
4.3.1. Primeira aula.....	45
4.3.2. Segunda aula.....	50
4.3.3. Terceira aula	55
4.3.4. Quarta aula	56
4.3.5. Quinta aula	63
4.3.6. Sexta aula	66
5. Resultados e discussões	71
5.1. Desempenhos nos pré-teste e pós-teste	71
5.2. Atividades Virtuais.....	83
6. Conclusão	86
7. Referências	89
8. Obras consultadas	92
9. Apêndices.....	93
9.1. Apêndice A – Questões	94
9.2. Apêndice B – Curso introdutório de mecânica quântica	96
9.3. Apêndice C - Roteiro para atividade virtual - parte I.....	126
9.4. Apêndice D - Roteiro para atividade virtual – parte II.....	130
9.5. Apêndice E - Lista de exercícios de revisão	133
9.6. Apêndice F – Análise Estatística.....	135

1. INTRODUÇÃO

A escola de ensino médio no Brasil passa por uma séria crise em suas funções. A nosso ver, dentre um conjunto de fatores importantes para essa crise está o fato de que em muitas disciplinas – a física em especial – o ensino tradicional, em geral, não vai além da simples instrução passiva e utilização automática de definições, exemplos e fórmulas. Essa metodologia, muitas vezes, não desperta interesse deixando o aluno desmotivado para o estudo das ciências exatas.

A disciplina de física normalmente é considerada muito difícil, ou, mesmo, a mais difícil, pelo aluno de ensino médio, por ser considerada muito abstrata. E mesmo alunos que conseguem “passar de ano” com relativa facilidade na disciplina, muitas vezes não compreenderam bem os conceitos mais fundamentais da física, tendo apenas chegado a desenvolver uma habilidade para memorizar definições, exemplos e fórmulas, junto com a habilidade matemática para manipulá-las a fim de obter respostas numéricas corretas (que poderíamos chamar, informalmente, de “formulismo”). Mas o que eles levarão para seu futuro como cidadãos, uma vez que definições, fórmulas e suas manipulações serão prontamente esquecidas? Tudo isso em detrimento do aprendizado significativo que todos desejaríamos proporcionar aos nossos estudantes, baseado na compreensão pessoal e articulada dos conceitos mais fundamentais da física por parte dos estudantes – algo que perdure, que incorpore à estrutura cognitiva do estudante e futuro cidadão.

O processo de ensino-aprendizagem no ensino tradicional muitas vezes ocorre com base apenas na transmissão e na reprodução do conhecimento. Contudo, sabemos que é de fundamental importância que, “ao invés de transmitir conhecimento, sob forma de soluções prontas, é preciso encorajar o aluno a encontrar por si as melhores formas de resolver os problemas que desafiam sua curiosidade e estimulam sua reflexão” (ASSIS, 1979, p.26). Os principais procedimentos utilizados na sala de aula em nossas escolas, na prática, continuam enfatizando a memorização de conteúdos, fórmulas, informações, cópia de trabalhos

existentes (o que agora é ainda mais fácil e cômodo, graças à internet) e o emprego de respostas padronizadas. Os projetos e os novos programas, via de regra, não existem; ou, quando existem, não se consegue implantá-los, ou não obtêm a repercussão desejada. Então, a rotina do professor segue sem qualquer alteração significativa.

A função do professor não é a de simplesmente transmitir o conhecimento científico ao aluno, de repassar conteúdos prontos e acabados, mas, sim, criar condições para que o aluno possa construir seu próprio conhecimento, sentindo-se desafiado e, ao mesmo tempo, incentivado a realizar descobertas por si mesmo. “Compreender é descobrir ou reinventar através da redescoberta e é preciso atender a essas condições se quisermos formar indivíduos que, no futuro, sejam capazes de produção e criatividade e não, simplesmente, de repetição.” (PIAGET, 1973, p.20). Todavia, segundo Demo (1991), freqüentemente encontramos professores, em especial no ensino médio, que estudam uma vez na vida, acumulam certo lote de conhecimento, o qual é transmitido aos alunos na sua disciplina, com uma didática reprodutiva e que vai se tornando cada dia mais desatualizada. E, de mais a mais, ainda encontramos nas salas de aulas engenheiros, agrônomos, médicos, dentistas, enfim, profissionais de outras áreas atuando como professores de física, sem habilitação e, portanto, sem preparo didático para isso.

Em que pese as deficiências de formação de nossos professores de física no ensino médio, e elas existem, sabemos na prática diária que mesmo “professores considerados muito bons por seus pares” confessam sentir dificuldades em sala de aula, o que revela a seriedade do problema; um problema que influencia negativamente, por realimentação, até a auto-estima do professor – e, portanto, sua segurança em sala de aula. Não se pode ensinar significativamente a quem não quer ou não sente interesse em aprender. Eis um princípio básico que não pode ser violado, seja qual for a abordagem pedagógica adotada, ou seja, a nosso ver, há algo inerente ao ensino tradicional em geral, e ao da Física em especial, que explica essa rejeição, digamos, por parte da maioria dos alunos de ensino médio.

É preciso resgatar urgentemente o interesse dos alunos em aprender física, e, para tal, devemos considerar alguns aspectos importantes que fazem parte de suas vidas. Nesse sentido, não podemos deixar de mencionar a influência das novas tecnologias relacionadas à informática (internet, vídeos *games*, *applets*, *softwares* etc.) e relacionadas aos aparatos tecnológicos (máquinas, processos industriais e outras atividades profissionais), que merecem

atenção especial por fazerem parte da área de Ciências da Natureza nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e por fazerem parte do cotidiano da maioria dos alunos. Isso, por sua vez, passa a influenciá-los de maneira significativa no modo como percebem o mundo que os rodeia, levando à compreensão e/ou ao manuseio de técnicas, relacionando teoria com prática, tentando entender a preparação para o trabalho - da qual tratam a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional/1996 e as Diretrizes Curriculares Nacionais do Ensino Médio.

Temos consciência de que não existem soluções prontas para a crise na educação, aplicáveis a situações particulares quaisquer, como se fossem remédio. Entendemos que, apesar de a inserção de tópicos de física moderna e contemporânea não conter todas as respostas para a atual crise da educação, oferece ao menos alguns caminhos, pois pode tornar as salas de aulas mais desafiadoras e divertidas. Por exemplo, ao mesmo tempo, pode-se conseguir que o estudante se envolva numa reflexão mais profunda dos tópicos abordados em sala de aula, por se tratar de tópicos intrigantes da vida moderna cotidiana, despertando nele curiosidade, a mãe de todas as invenções. Dessa forma, pode-se aumentar a sua disposição em aprender, na própria escola, assuntos que lêem em revistas de divulgação ou jornais ou em outros meios de comunicação modernos com os quais entram em contato.

É nessa ótica que concebemos e desenvolvemos nosso trabalho, com a advertência explícita de que não apresentaremos soluções para todos os problemas e inquietações inerentes ao ensino da física, mas, sim, trazendo elementos que possam contribuir para a solução de parte de alguns problemas nesse ensino, subsidiando os professores em suas práticas educacionais e contribuindo, assim, para o processo ensino-aprendizagem.

Tendo em vista tais reflexões, nosso trabalho propõe uma estratégia concreta para a inserção da mecânica quântica no ensino médio, fornecendo, ao mesmo tempo, subsídios especialmente selecionados a futuros professores de física de ensino médio através da produção de material didático relevante. A implementação da nossa proposta foi realizada com os alunos do curso de Física do V nível da Universidade de Passo Fundo em junho de 2006, em 24 períodos (de 45 minutos cada um) na disciplina de Didática da Física, por se tratar de uma proposta pedagógica que pode ser oportunamente utilizada pelos futuros professores de física em sua prática pedagógica profissional.

Uma das metas na produção do material didático, além da necessidade de estar adequado à realidade dos currículos e da carga horária disponível para a disciplina, é trazer alguma novidade em relação ao que se encontra nos livros didáticos encontrados no mercado. Essas obras, com raras exceções, priorizam uso intensivo de fórmulas, cujo verdadeiro significado na maioria das vezes escapa à percepção do aluno, fazendo uso sistemático de analogias com a mecânica clássica; ou, em alguns casos, os materiais relacionados à física quântica utilizam pura e simplesmente uma abordagem histórico-factual, o que é interessante, mas, em nosso entendimento não deve ser usado exclusivamente, deixando-se assim de abordar alguns aspectos importantes, em detrimento de outros.

Diante dessas preocupações, tentamos evitar, dentre os aspectos históricos abordados, privilegiar a mecânica clássica. Entendemos que os aspectos históricos abordados com tal ênfase podem contribuir negativamente para a aprendizagem de conceitos quânticos. Na fase inicial de descobertas e desenvolvimento da “velha teoria quântica” (entre 1900 e 1925), houve uma distinção natural para a mecânica clássica, adotada como referência. É o caso, por exemplo, dos primeiros modelos atômicos, especialmente o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio. Só mais tarde, a partir dos trabalhos seminais de Heisenberg (1925, mecânica matricial) e Schrödinger (1926, mecânica ondulatória) é que as analogias com a mecânica clássica começaram a ser abandonadas realmente, substituídas, na maior parte das vezes, por analogias com a óptica ondulatória.

A nosso ver, aspectos históricos são muito importantes por fazerem parte de herança cultural, porém existem analogias mais ricas e conceitualmente mais precisas entre a mecânica quântica (ondulatória) e a óptica ondulatória para serem exploradas do ponto de vista didático. Essas analogias têm íntima relação com a questão da dualidade onda-partícula de De Broglie e com o princípio da complementaridade de Bohr e podem servir como estratégia para nortear o aluno na adaptação de novos esquemas de assimilação para o desenvolvimento intelectual. Nesse sentido, não deixamos de abordar aspectos históricos da fase inicial do desenvolvimento teórico da mecânica quântica, mas tivemos grande cuidado para que esse tipo de abordagem não interferisse na formação do novo conhecimento, reforçando algumas concepções na visão clássica que podem vir a se tornar obstáculos epistemológicos, como, por exemplo, a noção de corpúsculo. Tais aspectos históricos abordados referem-se às principais anomalias encontradas nesse período, quando os físicos

tentavam explicações para os fenômenos microscópicos utilizando-se basicamente da física clássica.

A produção do nosso material não privilegiou exclusivamente essas características, mas apresenta-se como uma nova proposta no âmbito do ensino médio, mesmo porque materiais com tais características, escritos muitas vezes por pessoas com bom ou excelente conhecimento da mecânica quântica, e com grande experiência docente, existem em grande número no mercado e não haveria necessidade de se produzir mais um. Embora nossa abordagem inclua alguns aspectos históricos, o enfoque principal foi privilegiar a compreensão dos conceitos mais básicos da mecânica quântica, fazendo uma utilização mínima (mas não nula) do formalismo matemático.

Por outro lado, além da grande influência que referimos anteriormente, as novas tecnologias estão disponíveis para ajudar no aprendizado tanto do aluno quanto do professor. O computador cada dia é mais facilmente encontrado em escolas, ao menos em salas especiais das mesmas, além de muitos alunos terem acesso a computadores pessoais ou familiares. Portanto, cremos ser interessante investir tempo em tentar encontrar maneiras de utilizar esses recursos na formação dos professores e, por conseguinte, dos alunos com quem eles trabalharão no futuro. Em especial, a nosso ver, o potencial didático e formativo das simulações computacionais é muito grande, razão por que pretendemos explorá-lo neste trabalho. Este, portanto, foi o segundo viés do nosso trabalho: a utilização de simulações e de um *software* educacional – Doppelspalt² – para ensinar conceitualmente a mecânica quântica.

Um terceiro viés do nosso trabalho foi quanto à utilização de analogias com a ótica ondulatória, em vez de analogias com a mecânica clássica, as quais consideramos, em muitas situações, como obstáculos epistemológicos, ou seja, abordamos a mecânica quântica na versão formulada por Schrödinger, a da mecânica ondulatória, utilizando suas fortes analogias com a ótica ondulatória, explorando principalmente os fenômenos da difração e da interferência, como “porta de entrada” no mundo quântico e como estratégia para evitar e/ou contornar os obstáculos que inevitavelmente aparecerão.

² O *software* Doppelspalt, disponível na internet gratuitamente, verificar endereço nas notas bibliográficas.

Percebemos que existe atualmente uma tendência renovadora geral em mudar o currículo das escolas de ensino médio, especialmente no que se refere à disciplina de física. Segundo tal visão, seria preciso, entre outras coisas, transformar o ensino de física tradicionalmente oferecido em nossas escolas de modo a abordar também temas da física moderna e contemporânea. Os próprios PCNs apontam para a necessidade da inserção da Física Moderna no ensino médio, por estar fortemente conectada às tecnologias atuais e, também, porque existe pouco material didático disponível que trata desse tema. Segundo os PCNs, alguns aspectos da física moderna são indispensáveis para permitir que os alunos adquiriram uma compreensão mais abrangente sobre como organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo microscópico. A escola de ensino médio, portanto, deve começar a abordar seriamente a física do século XX.

Temos a expectativa de que nosso produto educacional possa contribuir com uma pequena parcela para que os futuros professores tenham uma formação mais direcionada para o aluno médio, de forma que consigam ajudar seus futuros alunos a acompanhar o desenvolvimento tecnológico e científico, mesmo que seja de forma elementar, mas correta, do ponto de vista conceitual.

Nos próximos capítulos apresentaremos a revisão feita sobre os estudos relacionados com o assunto, o referencial teórico adotado, a metodologia para a aplicação do produto educacional e os resultados obtidos com a sua aplicação.

2. ESTUDOS RELACIONADOS

Com o objetivo de identificar trabalhos já publicados que estejam direta ou indiretamente relacionados à inserção da mecânica quântica no ensino médio, fizemos um estudo da bibliografia existente. Essa revisão começou no primeiro semestre do ano de 2004 envolvendo uma busca de artigos publicados a partir do ano de 1994 e serviu como alicerce e estímulo para a elaboração do presente trabalho. A pesquisa priorizou dois tópicos especiais: o primeiro, relacionado à viabilidade de inserção da física moderna no ensino médio; o segundo, às propostas de estratégias didáticas existentes para a inserção da mecânica quântica no ensino médio.

Os artigos pesquisados foram publicados em revistas de ensino de física, em atas de encontros nacionais de Pesquisa em Educação em Ciências e, também, em materiais disponibilizados na internet, incluindo revistas eletrônicas com árbitro. Também relacionamos o material pesquisado com os Parâmetros Curriculares Nacionais.

2.1. VIABILIDADE DE INSERÇÃO DA FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

Na composição do novo ensino médio brasileiro, a partir da promulgação da recente Lei das Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDBEN) de 1996, regulamentada em 1998 pelas Diretrizes do Conselho Nacional de Educação, foram constituídos novos parâmetros que passam a regulamentar a definição geral dada na LDBEN, chamados Parâmetros Curriculares Nacionais, os PCNs. Os PCNs têm como objetivo difundir e orientar os professores quanto aos princípios da reforma curricular na busca de novas metodologias para o ensino. Segundo esses parâmetros, “a formação do aluno deve ter como alvo principal a aquisição de conhecimentos básicos, a preparação científica e a capacidade de utilizar as diferentes tecnologias relativas às áreas de atuação” (BRASIL, 1999, pág.15).

A Secretaria de Educação Básica, tendo como mediador o Departamento de Política do Ensino Médio, encaminhou no mês de agosto do presente ano (2006) para as escolas da rede pública estadual, o documento *Orientações curriculares para o ensino médio*, com a intenção de apresentar aos professores um conjunto de reflexões para servir de subsídios à prática docente. Tais reflexões retomam a discussão dos Parâmetros Curriculares Nacionais do ensino médio não só no sentido de esclarecer alguns pontos, mas, também, de aprofundá-los, desenvolvendo indicativos que ofereçam alternativas para o trabalho didático-pedagógico que atenda às necessidades e às expectativas das escolas e dos professores na estruturação do currículo para o ensino médio.

Em concordância com as diretrizes expostas nas *Orientações curriculares para o ensino médio*, a inclusão de teorias da física do século XX no ensino médio – como a da mecânica quântica – e o uso das novas tecnologias são dois aspectos que merecem atenção especial no planejamento de nossas aulas, especialmente no que diz respeito à motivação para o aprendizado dos conceitos e de suas relações e, também, por possibilitarem novas alternativas estratégicas para o trabalho pedagógico.

Em relação ao ensino da física, os PCNs destacam que o conhecimento de física no ensino médio ganhou um novo sentido a partir das suas diretrizes:

Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do ensino médio, não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento da Física, em outras instancias profissionais ou universitárias, ainda terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem (BRASIL, 2002, p.59).

É nesse sentido que a preparação para o trabalho deve ser orientada pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional/1996, tendo sempre em vista proporcionar um ensino da física preocupado com que o cidadão possa futuramente participar da realidade social em que vive, compreendendo os processos produtivos envolvidos e atingindo, assim, seu pleno desenvolvimento intelectual. Não podemos deixar que nossos alunos do ensino médio cheguem ao mercado de trabalho sem ter uma noção mínima da física quântica, que está diretamente ligada a várias áreas de atuação profissional, como na medicina, na eletrônica, na biologia, em aplicações industriais, enfim, em várias inovações tecnológicas que estão diretamente apoiadas sobre ela.

Há que se distinguir, portanto, dois aspectos do ensino da física na escola: “[...] a física como cultura e a física como possibilidade de compreensão do mundo” (BRASIL, 2006, p.54). Nesse sentido, os PCNs ressaltam que as disciplinas devem envolver conhecimentos práticos e contextualizados para a formação do cidadão contemporâneo, que corresponda a uma cultura geral crítica, corroborando, portanto, a idéia de que a física quântica abordada no ensino médio, além de fornecer suportes para a compreensão do mundo contemporâneo, deve fazer parte da cultura geral do futuro cidadão.

O artigo “*Introducing quantum physics in secondary school*” apresentado na III Conferência Internacional de História, Filosofia e Ensino de Ciências de 1995, escrito por Olival Freire Junior et al, destaca que o principal argumento utilizado para se propor a inserção da física quântica no currículo das escolas de ensino médio é o grande significado cultural dessa teoria científica para o mundo contemporâneo e para o futuro próximo. Segundo os autores, a inserção desse tema inclui também uma aproximação histórica da física moderna. A inclusão desse tópico no ensino médio passa por vários estágios do currículo, implicando mudanças nas maneiras de apresentar os conceitos da física clássica. As dificuldades inerentes à aprendizagem dos conceitos quânticos, na visão dos autores, não impede que seja trabalhada no ensino médio, pois tais dificuldades não são exclusivas da física quântica, estando presentes também na física clássica. Além disso, esses empecilhos envolvem inúmeras razões que estão sendo sistematicamente comprovadas em pesquisas em educação nas ciências.

O trabalho desses autores, desenvolvido em conjunto com professores universitários, professores de ensino médio e pesquisadores de história e de ensino de física, tem o respaldo de Bastos Filho, que escreveu o seguinte comentário em uma resenha no Caderno Catarinense de Ensino de Física a respeito do livro escrito por eles: O universo dos quantas:

Há três anos (final de outubro de 1995), estive presente à apresentação do trabalho de Olival e Rodolfo em Minneapolis, por ocasião do *Third International History Philosophy and Science Teaching Conference*. Achei a idéia de levar a Física Quântica ao 2º grau felicíssima, importantíssima e creio que não exageraria se dissesse, mesmo, que se trata de uma necessidade premente. A razão precípua dessa necessidade é o fosso que existe entre o conteúdo que é ensinado no 2º grau, que às vezes não vai além da Física de Galileu e de Newton, e o mundo moderno de final do segundo milênio, tão povoado de **quanta** (BASTOS FILHO, 1997, p. 127).

A viabilidade da inserção da física quântica no ensino médio é corroborada pelo crescente impacto dos conteúdos de física moderna e contemporânea que são necessários para um bom entendimento da cultura total – incluindo a cultura científico-tecnológica – criada pelo homem, “[...] bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos no ensino médio”. (TERRAZZAN, 1992, p.210)

Segundo Terrazzan (1992), para que a reforma curricular tenha êxito é imprescindível a participação direta dos professores do ensino médio. É nesse sentido que escolhemos trabalhar com futuros professores de física na aplicação do nosso produto educacional, como mencionamos anteriormente. Os professores devem tomar consciência de que a física ensinada na escola deve abordar aspectos como cultura e possibilidade de compreensão do mundo, tendo “[...] que atender às novas necessidades surgidas a cada dia, tornando-se cada vez mais básicas para o homem contemporâneo, portanto, os vários campos abertos pela Física deste século devem ter presença garantida nos currículos escolares” (PINTO; ZANETIC, 1999, p. 7).

Cavalcante e Benedetto entendem que “a inserção da Física Moderna no Ensino Médio passa a ser uma necessidade diante do exercício da cidadania, visto que este exercício baseia-se em um conhecimento mínimo das formas contemporâneas de linguagem e dos princípios científicos e tecnológicos que atuam na produção moderna”. (CAVALCANTE; BENEDETTO, 1999, p.437). Assim, a física moderna inserida no ensino médio pode ser uma ferramenta para ampliar os horizontes culturais e a autonomia no exercício da cidadania se o conhecimento físico for abordado como um modo de interpretar o mundo e de, assim, poder interferir na realidade, apresentando conceitos, métodos e linguagens próprios e privilegiando a evolução histórica, relacionada ao desenvolvimento tecnológico e aos muitos aspectos da vida em sociedade.

Nossa pesquisa também encontrou artigos onde se argumenta que não é prioridade a preocupação com a inserção de conteúdos de física moderna no ensino médio em virtude do pouco tempo disponível para o professor de física atualmente em nossas escolas. Para pessoas que defendem essa opinião, lembramos o quanto é comum excluirmos ou priorizarmos tópicos da física clássica nos nossos programas e que a inserção de novos tópicos pode ser justificada pela parte diversificada do currículo, que pode ocupar até 25% da grade curricular

total. “Desse modo, escolhas bem-feitas de conteúdos significativos assumem um papel fundamental, pois fica claro que não será possível trabalhar com extensas listas de conteúdos”. (BRASIL, 2006, p.55)

A maioria dos artigos consultados destaca a importância da inserção da física moderna no ensino médio, seja para atender às necessidades da sociedade moderna, seja para conhecimento científico ou cultura geral. Além disso, alguns dos trabalhos que já foram aplicados no ensino médio nos relatam resultados de aprendizagem com possibilidades de sucesso, como veremos no próximo tópico deste capítulo. Destacamos também neste estudo a contribuição que os PCNs trazem a nosso favor, apontando para uma reforma imediata para o currículo da física no ensino médio.

O fato é que os currículos de física precisam mudar e que, pelo menos, a física quântica (sem falar na relatividade e na física contemporânea) precisa ser abordada de forma introdutória e conceitual. Essa mudança precisa ser cautelosa e deve ter o envolvimento direto dos professores que atuam na disciplina de física. Nesse sentido, afirma Meneses:

É claro que precisa ser cautelosa a sinalização para a inclusão desses novos conteúdos, seja pelos desafios didáticos que implica, encontrando professores despreparados e os textos escolares desguarnecidos, seja porque as próprias universidades, ainda por algum tempo, continuarão a solicitar os velhos conteúdos em seus vestibulares. Será preciso algum tempo para que a mensagem seja primeiro, compreendida e, mais tarde, aceita. (MENESES, 2000, p.7)

Validada a preocupação em introduzir tópicos de física moderna no ensino médio e justificada a necessidade de atualizar o currículo de física, passamos a nos questionar acerca de como fazer essa inserção. Que estratégias utilizaremos? Como fazer uma proposta adequada à nossa realidade escolar?

2.2. ALGUMAS PROPOSTAS DE ESTRATÉGIAS DIDÁTICAS PARA A INSERÇÃO DA FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

Em resposta às nossas indagações, passamos, na segunda parte da nossa pesquisa, a buscar trabalhos que apontem, ou, ao menos, sinalizem direções e estratégias a tomar. Foram pesquisados trabalhos com diferentes abordagens – conceitual, histórica, experimental, filosófica – estabelecendo ou não elos com a física clássica, utilizando recursos

computacionais, com “formulismo” matemático etc. Enfim, tentamos abranger nessa revisão alguns artigos envolvendo esses diferentes tópicos. Sem pretender esgotar todas as possibilidades de material deste tipo na literatura, algumas propostas interessantes foram analisadas, as quais passamos a descrever.

Ostermann e Moreira justificam a hipótese de que “[...] há uma tendência nacional e internacional de atualização dos currículos de Física no ensino médio. No entanto, ainda é reduzido o número de trabalhos publicados que encaram a questão sob a ótica do ensino e, mais ainda, os que buscam colocar, em sala de aula, propostas de atualização” (OSTERMANN; MOREIRA, 2001, p. 135). Os autores já haviam realizado (2000) uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa – física moderna e contemporânea no ensino médio – e destacado a carência de trabalhos que apresentem propostas testadas em sala de aula, com os seus devidos resultados de aprendizagem. Nesse estudo eles destacaram um tópico onde relacionaram a existência de trabalhos sobre mecânica quântica testados em sala de aula com resultados de aprendizagem – o resultado encontrado foi um total de nove trabalhos, de alguns autores, como o grupo de Gil e Solbes (1987; 1988 e 1993), Fischler e Lichtfeldt (1992), Cuppari et al. (1997), Stefanel (1998), Pinto e Zanetic (1999). Desses destacaremos somente o artigo de Pinto e Zanetic e uma das propostas de Gil e Solbes, uma vez que todos os autores dos artigos estão bem expostos na revisão bibliográfica mencionada. A conclusão dos autores foi de que existe a possibilidade de êxito na inserção da mecânica quântica no ensino médio e há uma convergência no que se refere aos aspectos quânticos a serem ensinados, mas ainda há divergência na metodologia a ser utilizada, especialmente no que se refere à relação do entendimento dos conceitos quânticos em relação à física clássica.

Gil e Solbes (apud OSTERMANN; MOREIRA, 2000) defendem que a inserção da física moderna e contemporânea deve ter como principal vertente a exploração dos limites clássicos, não ensinando a física moderna segundo uma visão simplista, mas, ao invés disso, para evitar concepções alternativas, realçando as diferenças irreconciliáveis que existem entre a física clássica e a física moderna. Os resultados mostraram que a maioria dos estudantes envolvidos na pesquisa ignora a existência de anomalias e crises no desenvolvimento da física clássica, não sendo capazes de mencionar um só problema associado, tampouco, de assinalar alguma diferença entre a física clássica e a física moderna. Num de seus últimos trabalhos, os autores relatam que “foi possível obter resultados com a aplicação de um programa completo de atividades com 180 alunos entre 16 e 18 anos: apenas de 8 a 30% dos alunos, ao final do

curso, ainda ignoravam a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica; somente um terço dos alunos apresentava ainda concepções alternativas sobre dualidade onda-partícula, princípio da incerteza” (apud OSTERMANN; MOREIRA, 2000, p.39). Uma das conclusões a que os autores chegaram é de que é possível introduzir conceitos básicos de mecânica quântica no ensino médio, e sugerem para isso uma abordagem construtivista como condição para que ocorra a mudança conceitual.

Pinto e Zanetic (1999) apresentaram uma proposta numa escola da rede pública onde o perfil epistemológico de Gaston Bachelard referente ao conceito da luz foi utilizado como referencial teórico. Nesse trabalho destacaram-se os aspectos históricos, filosóficos e experimentais. Segundo os autores, a experiência mostrou que é possível levar a física quântica para o ensino médio, embora na atividade proposta os alunos tenham aprendido apenas um pouco sobre ela.

Cavalcante, Jardim e Barros (1999) defendem que a contextualização das principais características da física moderna pode ser feita por meio do estudo do comportamento dual, e, nesse sentido, fazem uma proposta de inserção da física moderna no ensino médio. A proposta é efetivada com a construção de um espectroscópio caseiro que utiliza um CD para decompor a luz em suas frequências características, demonstrando o uso de uma rede de difração; a fonte de radiação utilizada é uma caneta *laser*. A partir da demonstração, são introduzidos tópicos de física moderna relacionados.

Nessa mesma linha, Cavalcante e Tavalaro (2001) fazem uma proposta concreta de inserção da física moderna e contemporânea no ensino médio através de uma oficina que é construída com materiais de baixo custo e apresentada aos professores. O objetivo da oficina é a execução de vários experimentos para entender os fenômenos da difração e da interferência e o comportamento corpuscular da radiação, fornecendo, assim, embasamento para a compreensão do princípio da dualidade. Nesse trabalho se reforça a importância do nascimento da mecânica quântica na mudança de visão de mundo e de atitudes perante a vida do homem moderno. A condição necessária para que essa mudança de concepção de mundo ocorra, segundo os autores, é que a diferença fundamental entre o comportamento ondulatório e corpuscular seja bem compreendida. Para isso, inicialmente, trabalharam com as concepções alternativas dos alunos/professores, trazendo à tona discussões referentes ao assunto e, em seguida, após provocar o conflito necessário, mostraram as características da energia inerente

a cada comportamento. Num momento posterior, os estudantes trabalharam com vários tipos de ondas, em especial, as ondas eletromagnéticas. Os autores concluem seu trabalho garantindo que é possível inserir a mecânica quântica no ensino médio, o que dá um caráter interdisciplinar à oficina, além de ser um suporte para os professores de física: “Este trabalho assume uma visão universal que permite uma melhor compreensão das formas contemporâneas de linguagem e de melhor domínio dos conhecimentos de Filosofia e de Sociologia, necessários ao exercício da cidadania” (CAVALCANTE; TAVALARO, 2001, p. 314).

Moreira e Ostermann (2001) desenvolveram um trabalho de inserção da física contemporânea no ensino médio via formação de professores. O trabalho estendeu-se por três anos e constituiu-se de etapas: de elaboração do material, preparação de professores e aplicação em sala de aula. O resultado da experiência mostrou que é possível, por meio da inserção da física moderna e contemporânea, aprender conceitos físicos e, também, despertar a curiosidade científica. Essa afirmação justifica-se pelo fato de não terem sido encontrados obstáculos inerentes à natureza cognitiva e, de os obstáculos encontrados em relação aos pré-requisitos terem sido suplantados.

Observar se os pré-requisitos ou conhecimentos prévios impedem ou facilitam a construção de conceitos fundamentais relativos à mecânica quântica foi um dos objetivos do trabalho de Moreira e Paulo (2004), realizado em duas escolas de ensino médio da rede particular da cidade de Cuiabá, que envolveu aproximadamente cem alunos, para os quais foram transmitidos os referidos conceitos. Na primeira etapa, no ano de 2001, foram ministrados os conceitos básicos da mecânica quântica na interpretação de Copenhague, após o estudo da mecânica ondulatória, que enfatizou os fenômenos da difração e interferência, a construção histórica da natureza da luz, o espectro eletromagnético e o experimento de dupla fenda. Nessa etapa, o número de alunos envolvidos era de, aproximadamente, oitenta, em três turmas da primeira série do ensino médio. Na segunda etapa, no ano de 2003, as turmas envolvidas eram do segundo ano de ensino médio e os conteúdos mencionados, de ótica ondulatória, não foram trabalhados anteriormente nem na série antecedente. Nas duas etapas, o número total de aulas variou de 12 a 15. Quanto à estratégia de usar ou não a ótica ondulatória como pré-requisito, os autores concluíram que não houve influência significativa na construção dos conceitos quânticos, uma vez que os resultados nas duas escolas foram

bastante semelhantes. Os fatos sugeriram que os alunos estruturaram conceitos relevantes para a compreensão do universo quântico:

É possível verificar isso pelos depoimentos, respostas a questionários abertos e fechados e por relações conceituais estabelecidas em mapas conceituais: diferenciação entre a Física Clássica e a Física Quântica, correlação da quântica com os conceitos de probabilidade, indeterminismo e complementaridade, constatação de que tanto a luz quanto prótons, neutros e elétrons são onda-partículas e a ligação da Física Quântica com elementos do cotidiano. (MOREIRA; PAULO, 2004, p.71)

Também pudemos concluir que, embora os trabalhos nessa área apresentem uma crescente expansão, ainda há poucos que propõem uma inserção da mecânica quântica no ensino médio juntamente com propostas didáticas já aplicadas em sala de aula e com explorações de novos recursos didáticos – como o uso do computador para simulação de experimentos. A nosso ver, esses são fatores importantes para o aprendizado, desde que sejam usados de forma reflexiva e com um caráter formativo. Esse estudo também nos possibilitou uma visão do quanto nós, professores, estamos carentes de materiais que estejam ao nosso alcance e que nos possibilitem uma formação adequada e continuada. Com isso, corremos o risco de ficar cada dia mais desatualizados perante as inovações, tanto na área tecnológica quanto na área das ciências. Essa foi uma das motivações que levaram à realização deste trabalho de dissertação.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é fazer uma breve síntese do pensamento do autor utilizado com marco teórico, situando-o no contexto do nosso trabalho. O marco teórico utilizado em nosso trabalho foi a teoria cognitiva de Jean Piaget (1896-1980), classificada como construtivista pelo fato de se preocupar com a natureza e com a forma pela qual o conhecimento é obtido, atribuindo um caráter epistemológico e, ao mesmo tempo, genético ao processo de aprendizagem, em alusão ao processo histórico e individual do sujeito na obtenção desse conhecimento. A grande preocupação de Piaget foi compreender como se dá a construção do conhecimento individual, razão por que sua teoria é considerada uma teoria de desenvolvimento cognitivo, não teoria de aprendizagem.

Sem a pretensão de esgotar o assunto referente à epistemologia genética de Piaget, passamos a abordar alguns aspectos de sua obra em sentido mais amplo, aspectos que, a nosso ver, estão relacionados com o contexto do ensino de física no nível médio. Ao fazê-lo, pretendemos justificar a adoção do referencial escolhido.

São muitas as justificativas para a escolha de Piaget. Podemos começar dizendo que, historicamente, Piaget foi um dos precursores do construtivismo e, certamente, foi sua epistemologia genética a responsável por grande parte de estudos sobre o ensino das ciências nas décadas de 1960 e 1970³. Foi praticamente a partir da década de 70 que o comportamentalismo começou a dar espaço ao cognitivismo.

Não se trata de justificar o uso do pensamento piagetiano como marco teórico apenas por ser Piaget um dos pioneiros do construtivismo, mas sim, de ressaltar a importância das contribuições que Piaget trouxe para as nossas práticas em sala de aula, no que se refere à compreensão das mudanças conceituais e ao planejamento e organização dos conteúdos de

³ Os primeiros trabalhos de Piaget foram realizados na década de 1920 e estudam o pensamento da criança.

currículo abordados. Um dos grandes desafios da prática pedagógica, e também da formação de professores, é justamente o fato de, muitas vezes não conseguirmos fazer uma conexão entre o planejamento das aulas e a aprendizagem que com elas queremos proporcionar. A prática do professor em sala de aula afeta a forma como os estudantes encararão os novos conceitos, abordados inicialmente pelo professor, mas que deverão ser construídos pelos próprios educandos. Assim, em seu planejamento, a falta de clareza do professor com respeito aos objetivos que ele deseja alcançar e em relação aos referenciais teóricos em que ele apoiará sua proposta pedagógica pode afetar de maneira significativa a forma como o educando começa a construir seu conhecimento, podendo levá-lo a uma visão final distorcida da ciência em geral.

Em nosso entendimento, em seu planejamento segundo uma visão construtivista, o educador deveria enfatizar a importância da ação do aluno e, para que isso ocorra, deverá trabalhar com métodos ativos de aprendizagem, não passivos, com os quais os alunos costumam ser tratados como simples receptores de informações, capazes apenas de reproduzi-las. Dessa forma, a teoria piagetiana considera o aluno como um *sujeito* que interage com o *meio* (objetos), estruturando essas interações em forma de conhecimento adquirido, ou seja, aqueles professores que desejem adotar, ou já adotam, essa teoria do conhecimento como marco teórico para sua prática profissional deveriam partir sempre do princípio de que o conhecimento deve ser construído, e, sendo assim, não pode jamais ser considerado como pronto e acabado. Dessa forma, pela interação *sujeito-objeto*, Piaget introduz a questão sobre o que é o desenvolvimento, como se dá a construção do mesmo pelo sujeito e qual o verdadeiro significado da aprendizagem.

Na perspectiva interacionista do aluno (sujeito) com o meio (objetos), uma das vertentes pela qual optamos por usar em nosso trabalho foi a utilização de um objeto de manipulação virtual por parte dos alunos (um “objeto virtual”), que é o *software* Doppellspalt (já mencionado no capítulo de introdução). Além de representar o objeto a ser manipulado, o *software* serviu como elemento motivador para o aprendizado das relações para a promoção e facilitação das mudanças cognitivas dos conceitos que desejamos produzir nos alunos. Embora sempre seja, obviamente, preferível realizar um experimento a simulá-lo o em computador através do uso de algum *software*, no nosso caso se justifica o uso de um experimento virtual pelo fato de se tratar de um experimento que demandaria recursos de um laboratório avançado de física, algo que está muito distante da realidade de nossas escolas e,

mesmo, de nossas universidades, principalmente as do interior do estado. Em contrapartida, sua simulação em computador é simples; o *software* inclusive, está disponível livremente na internet para *download*, e boa parte de nossas escolas já dispõe de sala de informática para que os estudantes possam explorar (ao menos em duplas) as várias possibilidades de manipulação do “objeto virtual” representado pela bancada virtual simulada no computador; além disso, boa parte de nossos estudantes já têm acesso à internet, de uma forma ou de outra.

Entretanto, para que as atividades ultrapassem de fato um caráter meramente ilustrativo e venham a promover um aprendizado conceitualmente significativo da física quântica, a manipulação desse objeto virtual deve vir acompanhada de atividades exploratórias orientadas para o desenvolvimento mental do estudante, envolvendo, por exemplo, o questionamento dos significados de fórmulas e de resultados numéricos obtidos com estas, a comparação com outros resultados, a curiosidade e a experimentação, a reflexão e a obtenção de conclusões por parte do estudante. Para tal, nessa linha de atuação baseada na interação entre sujeito e objeto, optamos por usar o *software* Doppelspalt como um objeto de manipulação virtual com utilização orientada por meio de um roteiro exploratório razoavelmente extenso, variado e detalhado que se encontra disponível nos apêndices.

Segundo Silvie Parrat-Dayana, “o tema causalidade foi o que permitiu Piaget explicar com maior clareza sua concepção interacionista (entre sujeito e objeto) e construtivista do conhecimento” (apud MOREIRA; SOUSA, 2000, p.224). Esse é um dos motivos para focalizarmos aqui o tema causalidade, dentre os vários abordados por Piaget. A causalidade apresenta um ponto de vista científico, direcionado à física, especialmente no contexto de um estudo em que se proponha a formação do conhecimento físico. Ela trata das relações causais que levam a explicações, “[...]quando aborda o problema da explicação em Ciências, Piaget faz da causalidade um sinônimo da explicação em Física” (CARVALHO, 2005, p.54).

Baseando-nos nessas questões, a mudança conceitual que desejamos que ocorra na disciplina de física, especialmente em relação aos conceitos quânticos, passa a ser compreendida como um processo de construção de conhecimento no qual existe a preocupação e o interesse consciente acerca da maneira como esse conhecimento é construído individualmente. Numa perspectiva piagetiana, consideramos essencial que, ao ensinar algum conceito físico, não podemos ter intenção de partir do nada, como se o estudante fosse uma *tabula rasa*, mas, devemos, sim, levar em conta os fenômenos já conhecidos pelos alunos e

mostrar-lhes as conexões existentes entre isso tudo e o novo conceito físico introduzido, de maneira a orientar e otimizar o processo individual de cada estudante. Por exemplo, não podemos abordar alguns conceitos da mecânica quântica considerando-os um assunto completamente novo e desvinculado da física clássica que os alunos estudaram previamente, como se eles não pudessem relacioná-los com os fenômenos e os conceitos já estudados. No caso específico de nosso produto educacional, partimos do pressuposto de que os alunos desejam e podem descobrir essas conexões por meio de analogias com a óptica ondulatória.

Piaget e Garcia apontam essas conexões como causais: “Explicar um fenômeno natural se reduz, em última instância, a mostrar suas conexões causais com fenômenos já conhecidos” (PIAGET; GARCIA apud CARVALHO, 2005, p. 55). Segundo essa concepção, é necessário que o professor de física e de ciências em geral saiba a diferença entre o conceito de causalidade e legalidade (a legalidade refere-se à lei que exprime uma regularidade ou um padrão, ao passo que a causalidade implica uma explicação), a qual é uma das deficiências do ensino praticado em nossas escolas de ensino médio: conteúdos de física trabalhados unicamente sob aspectos legais, deixando de lado os aspectos causais que estão intimamente ligados com a explicação dos fenômenos. Segundo Piaget, a diferença entre o aspecto da legalidade e o aspecto da causalidade repousa sobre quatro pontos principais:

- As leis se referem às relações repetíveis, obtêm-se por constatação de fatos, permanecendo, por conseguinte, no domínio dos observáveis. As relações causais pelo contrário repassam os observáveis;
- As leis só expressam relações gerais; a causalidade envolve relações necessárias;
- As leis podem constituir afirmações isoladas sobre fatos particulares; a explicação causal requer relações coordenadas em um sistema, e só o sistema mesmo é fonte de necessidade;
- A legalidade só envolve operações aplicadas aos objetos; a causalidade exige uma atribuição das operações do sujeito e do objeto (CARVALHO, 2005, p. 55).

Explicar um fenômeno é torná-lo inteligível, é buscar sua origem, observar e inferir sobre suas transformações, identificar suas propriedades, construir hipóteses ao seu respeito, ou seja, construir um modelo cognitivo de compreensão acerca dele. Dominguez (1992) ressalta que a explicação causal de um fenômeno envolve dois aspectos: as transformações e as conservações. Quando, por exemplo, num experimento no qual simulamos elétrons passando por uma única fenda, observamos no anteparo um padrão típico de difração (no caso de fenda única) ou de interferência entre duas fontes luminosas coerentes (fenda dupla); ou

quando simulamos elétrons passando por um anteparo de fenda dupla e observamos um padrão de difração e de interferência em uma tela. Para explicar⁴, em uma perspectiva piagetiana, em que consiste o modo de implementação desse experimento, as explicações causais evidenciam os seguintes aspectos: na segunda parte da simulação (com fenda dupla), quando apareceram elementos virtuais que não estavam presentes na situação inicial (de fenda única), a situação de origem sofreu modificações, isto é, ocorreram transformações, uma das quais se refere à formação do padrão de interferência que aparece no lugar do padrão típico de difração. Por outro lado, a explicação causal evidencia elementos que se conservaram ao longo das transformações, isto é, houve conservações, e uma delas se refere ao padrão de difração, que não sumiu para dar lugar ao de interferência, mas continua presente, “modulando” a intensidade máxima das franjas do padrão de interferência. Resumindo, a situação inicial transformou-se e surgiram novos elementos, simultaneamente com a manutenção de outros.

A explicação causal refere-se a um fenômeno material; tem por objeto a realidade. Baseia-se no pressuposto de que os objetos existem e interagem entre si, independentemente do sujeito que os observa e explica. O pressuposto realista, que afirma a existência do real, caracteriza a interpretação piagetiana da causalidade. (DOMINGUEZ, 1992, p.129)

Como podemos situar a questão da causalidade no contexto de nosso trabalho?
Começamos citando as palavras de um dos fundadores da física quântica, Niels Bohr:

A verdadeira natureza da teoria quântica [...] nos força a considerar a coordenação espaço-temporal e a exigência de causalidade, cuja união caracteriza as teorias clássicas, como características complementares, mas exclusivas, da descrição, simbolizando, respectivamente, a idealização da observação e da definição. (BOHR apud BASTOS FILHO, 2003, p.15).

Segundo Bohr, no mundo microscópico descrito pela física quântica e para um dado conjunto de atributos físicos que se queira medir (posição e *momentum* linear, por exemplo), não dispomos de leis espaço-temporais e causais simultâneas, como na física clássica para um atributo físico qualquer, mas podemos ter leis espaço-temporais e causais de forma *excludente* (porém complementar):

⁴ Segundo Piaget (apud DOMINGUES, 1992), explicar é conhecer o modo de produção.

Quando fosse implementada uma descrição rigorosamente *espaço-temporal* excluir-se-ia a descrição *causal*; do mesmo modo, quando fosse implementada uma descrição rigorosamente *causal*, excluir-se-ia, por conseguinte, a descrição *espaço-temporal*. Em suma, as duas descrições são válidas quando vistas *per si*, mas, necessariamente, se excluem mutuamente (BASTOS FILHO, 2003, p.16).

Essa interpretação de Bohr refere-se ao seu princípio de complementaridade, o qual nos permite compreender fenômenos da física quântica que não podem ser explicados segundo uma abordagem que seja simultaneamente causal e espaço-temporal. A complementaridade foi explorada em nosso trabalho com o uso do *software* Doppelspalt no contexto da noção de dualidade onda-partícula, na qual os alunos buscavam compreender a natureza da luz. Pela manipulação do *software* e seguindo um roteiro exploratório de atividades, os efeitos observados no anteparo ocorriam na forma característica daqueles produzidos por corpúsculos, enquanto o efeito coletivo dos mesmos (sejam os corpúsculos fótons ou elétrons) resultava num padrão característico daqueles produzidos por ondas. Essas manifestações não são observadas simultaneamente, ou seja, para que o aspecto corpuscular seja evidenciado, precisamos observar o efeito produzido (no anteparo) por um único corpúsculo (feixe monofotônico ou monoeletrônico), quando, então, o aspecto ondulatório é excluído. Para que este seja observado, o comportamento individual dos fótons deixa de ser relevante, mas o conjunto dos fótons constitui um feixe de luz que apresenta um comportamento típico de um fenômeno ondulatório, levando o estudante a se convencer de que, na explicação do experimento, ele teria de levar em conta a possibilidade de a luz se comportar ora como sendo formada por partículas, ora como uma onda. Analogamente, em relação ao espaço-tempo e à causalidade, também os aspectos ondulatórios e corpusculares foram aspectos mutuamente excludentes, mas complementares.

Procurando elucidar a relação existente entre a causalidade e o princípio de complementaridade de Bohr, Selner destaca: “Dessa forma, a idéia de complementaridade está ligada à noção de que um fenômeno não precisa surgir somente quando é causado, no sentido estrito do termo, por algum fator qualquer, mas pode surgir quando o que existe atualmente, mantendo-lhe em estado latente, deixar de existir” (SELNER, 2006, p.27). O comentário refere-se ao processo de medida quântico e ao chamado “colapso da função de onda” (na interpretação de Copenhague), que, de certa forma, constitui uma “atualização” do que estava “latente”. Com respeito ao curso elaborado como decorrência de nosso trabalho, essa compreensão por parte do aluno foi o objetivo final do curso, pois demanda o

conhecimento prévio por parte do aluno de noções como função de onda, números complexos e densidade de probabilidade quântica (módulo ao quadrado da função de onda complexa), o que só ocorreu na parte final do curso.

Num sentido mais direcionado para a prática docente, um dos tópicos que justificam a abordagem da questão da causalidade nas aulas de mecânica quântica (e em outras disciplinas) é que, ao buscar maneiras alternativas de conceber o objeto em estudo, o aluno vai transformando suas próprias explicações para o comportamento observado e, como consequência, passa a interpretar a realidade física de forma mais produtiva. Isso significa que a causalidade, por supor um modelo explicativo como suporte para explicar importantes conceitos como a interpretação dual da luz, interfere nas mudanças cognitivas conceituais que desejamos que ocorram em nossos alunos, sem perder de vista que um dos objetivos de nosso trabalho é a inserção da mecânica quântica no ensino médio.

Na tentativa de compreender como ocorrem as mudanças cognitivas conceituais, embora conscientes de que a mudança conceitual é um problema de muita complexidade, foram utilizados em nosso trabalho conceitos fundamentais da teoria piagetiana, tais como *assimilação*, *acomodação* e *equilibração*, que são de grande utilidade na tentativa de provocar as mudanças desejadas, consideradas como ferramentas para ensinar a física de forma mais eficiente.

Como mencionamos anteriormente, na perspectiva piagetiana as mudanças cognitivas são originadas da interação do sujeito com o meio, isto é, o conhecimento surge da interação. O conhecimento significativamente adquirido é resultado da construção individual das estruturas cognitivas, cujo equilíbrio é uma das várias maneiras com que Piaget define inteligência. E mesmo que esse equilíbrio possa ser perturbado, a ação do sujeito pode restituir-lo, pois a “inteligência é o instrumento que permite o indivíduo atingir este equilíbrio.” (MOREIRA; OSTERMANN, 1999, p.11).

Segundo Piaget, as estruturas cognitivas se transformam-se através da *adaptação*, um processo considerado como decorrência de um equilíbrio dinâmico a ser atingido, na mente do indivíduo, entre a *assimilação* e *acomodação*. A assimilação consiste em agrupar

elementos da realidade em esquemas⁵, o que pressupõe que a ação do sujeito sobre o ambiente acontece a partir dos objetos de conhecimento. Contudo a mente não se modifica durante o processo, pois já possui padrões previamente organizados a respeito do objeto de conhecimento. Durante o processo de assimilação, apesar de haver interação sujeito-objeto, não ocorrem o desenvolvimento e a evolução das estruturas de cognição.

O processo de assimilação é evidenciado nas aulas de mecânica quântica quando os alunos não compreendem um conceito novo e, ao invés de tentar compreendê-lo, continuam adotando seus esquemas anteriores e tentam “encaixar”, de alguma maneira, o novo conhecimento a eles. Por exemplo, quando os estudantes (ou os próprios professores) descrevem o movimento de um elétron ao redor de um núcleo atômico, presumidamente com velocidades e posições simultaneamente bem definidas (imaginando e desenhando trajetórias, o que corresponde a uma descrição determinística), estão fazendo uso de suas concepções anteriores, tentando incorporar ou “encaixar” o conceito novo (descrição probabilística) nelas sem ter de modificar suas estruturas cognitivas prévias.

Piaget define a assimilação como:

“[...] é a integração à estruturas prévias, que podem permanecer invariáveis ou são mais ou menos modificadas por esta própria integração, mas sem descontinuidade com o estado precedente, isto é, sem serem destruídas, mas simplesmente acomodando-se à nova situação. (PIAGET, 1996, p.13)

Quando os esquemas ou as estruturas cognitivas se modificam em função do objeto de conhecimento que está se tentando assimilar, ocorre a *acomodação*. É “[...] na acomodação que o organismo se desenvolve através da construção de novos esquemas, a fim de poder assimilar determinadas situações” (MOREIRA;OSTERMANN, 1999, p.12). Fazendo referência ao exemplo que utilizamos anteriormente, do movimento dos elétrons ao redor de um núcleo atômico, os alunos tentam continuamente adaptar os novos conceitos abordados em sala de aula aos esquemas (de posição, velocidade e trajetória bem definidos) que possuíam até então. A partir do instante em que passam a existir influências de situações externas – como a do professor, através da sua metodologia didática – que os questionem e,

⁵ Algumas noções utilizadas para esquemas na teoria piagetiana “aquilo que é generalizável numa ação” (RAMOZZI-CHIAROTTINO, 1988, apud MARTINS, 2004, p. 60); “é um padrão organizado de comportamento” (MOREIRA; OSTERMANN, 1999, p.12).

ao mesmo tempo, que os estimulem a assimilar uma concepção probabilística e não determinística do movimento do elétron, os alunos podem vir a acomodar o esquema a uma nova estrutura cognitiva, criando, assim, um novo esquema próprio, passando a dispor, a partir daí, de um (antigo) esquema para corpos que descrevem movimentos determinísticos e de um outro, radicalmente novo, para corpos microscópicos, que descrevem movimentos regidos por leis probabilísticas.

É nesse sentido que se entende o conceito piagetiano de acomodação. “Chamaremos acomodação (por analogia com os “acomodatos” biológicos) toda modificação dos esquemas de assimilação sob a influência de situações exteriores (meio) ao quais se aplicam. (PIAGET, 1996, p. 18)”.

Portanto, a acomodação traz consigo duas opções: a de criar novos esquemas mentais e a de modificar esquemas já existentes. Tanto uma quanto a outra levam ao desenvolvimento cognitivo.

Por todas as idéias expostas, em nossa proposta pedagógica pretendemos estimular os alunos para que construam e modifiquem seus próprios esquemas mentais, levando-os a incorporar os novos conhecimentos conceituais básicos de mecânica quântica. Se for significativo o aprendizado desses conhecimentos, ocorrerá a acomodação, que depende dos esquemas de assimilação construídos individualmente pelos estudantes; caso contrário, poderá não ocorrer um aprendizado significativo, ou seja, os alunos não chegarão a construir novos esquemas nem a modificar os esquemas preexistentes.

A acomodação e a assimilação complementam-se no sentido de que não existe assimilação sem acomodação, e vice-versa:

Não há acomodação sem assimilação, pois acomodação é reestruturação da assimilação. O equilíbrio entre assimilação e acomodação é a *adaptação* à situação. Experiências acomodadas dão origem, posteriormente, a novos esquemas de assimilação e um novo estado de equilíbrio é atingido. Novas experiências, não assimiláveis, levarão a novas acomodações e a novos equilíbrios (adaptações) cognitivos. (MOREIRA, 1999, p.100)

O equilíbrio existente entre a assimilação e a acomodação – a *adaptação* – é o que leva o indivíduo a ter suas estruturas cognitivas modificadas e, conseqüentemente, ao desenvolvimento cognitivo. Em outras palavras, o sujeito progride à medida que se adapta às

situações naturalmente propostas pelo próprio meio, desenvolvendo instrumentos para vencer os novos desafios, desde que esteja interessado e motivado para vencê-los. Durante as inúmeras interações com o meio, com a assimilação e a acomodação, o sujeito busca o avanço necessário para alcançar o equilíbrio, até que um novo obstáculo torne a desequilibrá-lo novamente. Para Piaget (apud MOREIRA, 1999), é por meio dessa sucessão alternada de equilíbrio e desequilíbrio que ocorre o desenvolvimento cognitivo:

Cada nível sucessivo de equilíbrio atinge uma forma melhor de conhecimento através da adição e reorganização dos elementos cognitivos. Essas mudanças quantitativas e qualitativas resultam em novas relações, novos entendimentos e a solução de certos problemas, mas também abrem à possibilidade de novas questões, problemas e novos desequilíbrios. Para reconciliar a estabilidade e as mudanças que ocorrem no desenvolvimento cognitivo e enfatizar o aspecto dinâmico do processo, Piaget se refere à **equilibração majorante** (MOREIRA, 1999, p. 13).

Com base nas argumentações expostas, podemos dizer que a equilibração majorante é a responsável pelos equilíbrios e desequilíbrios, isto é, é o processo que leva ao desenvolvimento do conhecimento. Segundo Moreira (1999), as implicações dessas proposições para o ensino são evidentes e devem ser ativadas, uma vez que educar significa, justamente, provocar o desequilíbrio no organismo (mente) do educando para que ele, procurando atingir um novo equilíbrio (equilibração majorante), se reestruture cognitivamente e aprenda. Em nosso entendimento, cabe ao professor ativar esses mecanismos no aluno, levando-os em conta dentro do nível de desenvolvimento mental do aluno.

Ao sustentar que as estruturas cognitivas constituem uma construção gradual do conhecimento, Piaget concluiu que existem *estágios de desenvolvimento mental*, os quais passaremos a abordar, dando prioridade àquele que se encontra a maioria de nossos alunos do ensino médio, por serem eles os alvos de nosso trabalho.

Ao construir e reconstruir sucessivamente as suas estruturas cognitivas, o indivíduo vai se tornando cada vez mais suscetível à equilibração, que leva ao desenvolvimento mental. Piaget divide o desenvolvimento intelectual em quatro grandes períodos: *sensório-motor* (de 0 a 2 anos), *pré-operacional* (de 2 a 7 anos), *operacional-concreto* (de 7 a 11 anos) e *operacional-formal* (de 11 a 15 anos).

Sem perder de vista o enfoque do nosso trabalho, faremos uma rápida abordagem dos fatores que interferem na construção do conhecimento e, ao mesmo tempo, como mencionamos anteriormente, focalizaremos a faixa etária dos adolescentes, que, via de regra, se encontram no período das operações formais.

Em termos de pensamento, a diferença entre a criança (que se encontra no período operacional concreto) e o adolescente é que a criança organiza seus pensamentos desde que consiga recorrer a eventos e objetos concretos, ou seja, depende do mundo concreto para chegar à abstração. Seu pensamento é reversível; a criança consegue representar ações no sentido inverso de ações anteriores e, gradualmente, vai interpretando a realidade sob novas perspectivas, de forma que o seu pensamento não é mais centralizado, seu próprio eu não é tomado mais como centro de todo o interesse, como era até então: o egocentrismo é aos poucos deixado para trás. Nesse período a criança não está apta ainda para trabalhar com hipóteses. Conforme Nitzke et al (1997) é neste estágio que a criança desenvolve noções de tempo, espaço, velocidade, ordem, casualidade, sendo então capaz de relacionar aspectos distintos e abstrair dados da realidade. Embora não se limite mais a uma representação imediata, é dependente do mundo concreto para abstrair.

Em contrapartida, o adolescente não necessita de observação real para chegar às suas conclusões. É nesse estágio que o indivíduo se encontra apto a deduzir relações a partir de hipóteses. Em outras palavras, as estruturas cognitivas dos adolescentes já atingiram o nível mais alto de desenvolvimento e, com elas, eles são capazes de aplicar o raciocínio lógico a todas as situações.

[...] O que surpreende no adolescente é o seu interesse por problemas inatuais, sem relação com as realidades vividas no dia-a-dia, ou por aqueles que antecipam, com uma ingenuidade desconcertante, as situações futuras do mundo, muitas vezes quiméricas. O que mais espanta, sobretudo, é a capacidade do adolescente de elaborar teorias abstratas (PIAGET, 2004, p.58).

Em concordância com as palavras de Piaget, acreditamos ser exatamente nesse período das operações formais que devem ser feitas as inserções das teorias: “[...] o adolescente é um indivíduo que constrói sistemas e teorias”(PIAGET, 2004, p.58). É o caso de nossa proposta de inserção da mecânica quântica no ensino médio, no qual trabalhamos com a abstração do pensamento, priorizando a realização de experimentos de pensamento: “As operações formais fornecem ao pensamento um novo poder, que consiste em destacá-lo e

libertá-los do real, permitindo-lhe, assim, então, a liberação do pensamento” (PIAGET, 2004, p.60).

Convém também lembrar que faz parte de nossa proposta didática a manipulação de objetos⁶, atividade que pode ser compreendida no período das operações concretas, uma vez que os alunos trabalham com relações num nível concreto, isto é, os objetos reais ou pensamento sobre eles estão envolvidos. Acreditamos que essa retomada das operações concretas facilita os procedimentos do pensamento formal, uma vez que proporciona condições para o aluno agir sobre o objeto promovendo mudanças em suas estruturas. Na visão de Piaget, a manipulação concreta, mesmo não sendo a única estratégia a ser considerada, tem grande influência na aprendizagem. Num sentido mais amplo, segundo Piaget:

Só há aprendizagem quando há acomodação, ou seja, uma reestruturação da estrutura cognitiva (esquemas de assimilação existentes) do indivíduo, que resulta em novos esquemas de assimilação. A mente, sendo uma estrutura (cognitiva) tende a funcionar em equilíbrio, aumentando permanentemente, seu grau de organização interna e de adaptação ao meio. Entretanto quando este equilíbrio é rompido por experiências não-assimiláveis, o organismo (mente) se reestrutura (acomodação), a fim de construir novos esquemas de assimilação e atingir novo equilíbrio. Para Piaget, este processo reequilibrador, que ele chama de *equilíbrio majorante*, é o fator preponderante na evolução, no desenvolvimento mental, na aprendizagem (aumento de conhecimento) da criança (MOREIRA, 1999, p. 102).

A aprendizagem pode ser descrita adotando-se como ponto de partida os esquemas de assimilação que o sujeito já utiliza. Esses esquemas, naturalmente, são diferentes para cada faixa etária e assinalam o desenvolvimento mental como constituído de períodos. Não podemos esquecer que cada aluno pode ter seus próprios esquemas de assimilações, de acordo com sua personalidade, com seu modo de agir, com a forma de trabalhar suas concepções, com o modo como interage com o objeto de estudo, com os colegas, com o professor, enfim, respeitando, além do período de desenvolvimento mental de cada aluno, suas individualidades.

Embora o marco teórico de nosso trabalho tenha sido o pensamento piagetiano, em nosso planejamento de curso também utilizamos a noção de obstáculo epistemológico, de Gaston Bachelard (1884-1962). Mesmo sendo considerado mais um epistemólogo da ciência

⁶ Um dos objetos trabalhados foi o *software* Doppelspalt que já mencionamos anteriormente.

do que propriamente um pedagogo, Bachelard criou conceitos que ainda hoje são muito importantes para nortear o trabalho pedagógico, em especial a noção de *obstáculos epistemológicos*, contra as quais devemos nos prevenir. Segundo Martins:

Ao analisar o progresso da ciência (cuja existência não põe em dúvida), Bachelard concluiu que é em termos de obstáculos que devemos colocar o problema do conhecimento científico. Não se trata, porém, de priorizar dificuldades devidas à complexidade dos fenômenos, como poderia parecer à primeira vista. Esses obstáculos surgem inevitavelmente na relação dos sujeitos com os objetos do conhecimento, aparecem no “âmago do próprio ato de conhecer” – são *obstáculos epistemológicos*. (MARTINS, 2004, p. 21).

Os obstáculos epistemológicos são “[...] perturbações que se incrustam no próprio ato de conhecer e que constituem retardos ou causas de inércia de pensamento.” (BULCÃO, 1981, p.46). Esses obstáculos, que fazem parte da relação do sujeito com o objeto do conhecimento, acabam dificultando a abstração e a construção dos novos conceitos. Segundo Bachelard, há uma ruptura muito grande entre conhecimento vulgar e conhecimento científico:

Quando o conhecimento vulgar e o conhecimento científico registram o mesmo facto, este não tem certamente o mesmo valor epistemológico nos dois conhecimentos. Enquanto o conhecimento vulgar permanece ligado a princípios empiristas de generalidade, de utilidade e de finalismo, o conhecimento científico está cada vez mais associado a princípios racionais, ele é cada vez mais teórico (SANTOS apud BACHELARD 1991, p.148).

Tais obstáculos são intrínsecos ao ato de conhecer e seu surgimento, como dissemos, é inevitável. Para Bachelard, portanto, o problema do conhecimento deve ser tratado na forma de “superação” de obstáculos sucessivos. Trata-se de uma epistemologia de caráter claramente racionalista, na medida em que se opõe à epistemologia empirista, porém não de forma extrema, pressupondo que o conhecimento nasça inteiramente da razão, mas de uma forma intermediária e crítica, sem abandonar totalmente o empirismo, mas recuperando-o de uma nova ótica. Em sua obra *A formação do espírito científico* (1938), Bachelard analisou sistemática e exaustivamente a natureza desses obstáculos, com base principalmente em exemplos do desenvolvimento científico do século XVIII. Segundo Bachelard, um primeiro obstáculo epistemológico para o indivíduo é a *experiência primeira*, que coloca os fatos antes da razão, produzindo no estudante um empirismo “fácil”, extremamente superficial. Não precisa compreender, apenas ver; o espírito pré-científico se satisfaz com essa primeira experiência. Bachelard descreve outros obstáculos, tais como o obstáculo *substancialista*, que

atribui a uma mesma substância qualidades distintas; o obstáculo *animista* que empresta “vida” à matéria e resulta das aplicações de “intuição de vida” aos fenômenos, e o *imagismo*, em que o excesso de imagens torna-se um obstáculo epistemológico. A idéia de obstáculo epistemológico, quando particularizada, leva ao conceito de noção-obstáculo, muito presente no ensino de física moderna, tais como o conceito de “corpúsculo”, o “coisismo” e o “choquismo”.

Entretanto, justamente pelo caráter fundamentalmente filosófico do pensamento de Bachelard é que optamos também pela teoria cognitiva de Piaget para nos orientar nos aspectos mais práticos e concretos do trabalho proposto e em sua aplicação em sala de aula. Não nos deteremos aqui em tentar expor o referencial bachelardiano por se tratar de um vasto corpo de conhecimento e de noções, e também porque nosso objetivo foi o de trabalhar somente a questão dos obstáculos epistemológicos da epistemologia de Bachelard.

A nosso ver, a grande questão a ser considerada neste momento, a respeito da utilização desses dois pensadores como marcos teóricos é saber se não existem incompatibilidades intransponíveis entre os pensamentos formulados pelos dois teóricos; se realmente existe um grau de compatibilidade suficiente entre os dois pensamentos que justifique nosso intento. Segundo Martins (2004), existem certos aspectos que propiciam um diálogo com Bachelard e Piaget na questão do conhecimento, ou seja, as abordagens bachelardiana e piagetiana, na maioria dos aspectos, não são contraditórias, mas complementares. Segundo o autor, há também importantes diferenças entre ambos, mas as semelhanças parecem ser mais acentuadas e proveitosas; mesmo assim, a maior parte dos aspectos que poderiam ser considerados contraditórios é colocada como questões a serem refletidas:

[...] Bachelard é descontinuista, admitindo a presença de *rupturas* no processo de construção do conhecimento científico, seja o conhecimento historicamente elaborado ou aquele que o indivíduo constrói. O novo conhecimento sempre rompe com o anterior, daí a necessidade da superação de obstáculos, da retificação de erros. Já a epistemologia genética não postula a existência de rupturas mas, ao contrário, oferece uma visão de verdadeira continuidade quando analisa as leis gerais do desenvolvimento e a formação das estruturas cognitivas. Sobre isso, gostaríamos de deixar duas questões em aberto (que talvez sejam, no fundo, a mesma questão): por trás das rupturas de Bachelard poderia ser encontrada alguma continuidade essencial do pensamento, no nível das estruturas cognitivas? Não seria o processo de equilibração majorante [...] marcado por rupturas, se não no nível operacional, no nível dos conteúdos do pensamento? (MARTINS, 2004, p.51)

Existem autores que não acreditam que a equilibração deixe espaços para rupturas. Mortimer (2000), por exemplo, afirma: “Piaget define a tendência ao desenvolvimento de estruturas cognitivas contínuas entre si, pois não são previstas rupturas e descontinuidades em seu sistema, uma vez que sempre tende a se alargar seja em extensão ou compreensão” (MORTIMER, 2000, p.62). Não temos a pretensão de banalizar essa importante discussão, mas queremos evidenciar como esses dois aspectos, ruptura e continuidade, surgiram durante a efetivação do curso proposto. A ruptura porque a mecânica quântica introduz formas de pensar totalmente novas para o estudante, que vão radicalmente contra as noções clássicas em nós introjetadas de maneira muito forte, pois a física com que nos deparamos e a linguagem e as noções que usamos para explicá-la e descrevê-la desde pequenos são clássicas. Nesse sentido, a mecânica clássica de partículas constitui um obstáculo epistemológico que terá de ser superado a fim de que o estudante adquira uma visão de mundo realmente "quântica" da natureza. Mas a continuidade também está presente, também é inevitável, pois usamos a óptica ondulatória como analogia e como uma espécie de "âncora" para o novo conhecimento abordado (a mecânica quântica). Essa analogia representa, em certo sentido, uma continuidade.

Cabe ao educador não negligenciar os obstáculos que certamente surgirão nas suas aulas, dando condições para que o aluno consiga vencê-los, e, paralelamente motivá-los constantemente a participar ativamente no processo educativo, que deve ser “acompanhado de ações e demonstrações e, sempre que possível deve dar aos alunos a oportunidade de agir”. (MOREIRA, 1999, p.104). Segundo Kubli:

[...] essas ações e demonstrações devem estar sempre integradas à argumentação, ao discurso, do professor. Seria uma ilusão acreditar que ações e demonstrações, mesmo realizadas pelos alunos, têm em si mesmas o poder de produzir conhecimento: elas podem gerá-lo somente na medida em que estiverem integradas à argumentação do professor (KUBLI, 1979, apud MOREIRA, 1999, p. 105).

Por todas as idéias expostas, que nortearam nosso trabalho, acreditamos que o educador necessita, em sua prática pedagógica, além de ter um constante aperfeiçoamento, ter coerência entre suas ações e o suporte teórico usado. Além disso, é indispensável que trabalhemos com métodos ativos, nos quais o educando seja parte integrante, segundo uma perspectiva construtivista. Não temos dúvida de que a teoria de Piaget, na linha de ação

utilizada em nosso trabalho, muito contribui para a prática pedagógica, mesmo sendo uma pequena parcela da vasta obra piagetiana.

4. METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia usada no desenvolvimento do material instrucional. Num primeiro momento, faremos o relato do contexto onde a proposta foi aplicada; na sequência, faremos à descrição da elaboração do material instrucional e o relato de sua aplicação em sala de aula.

4.1. CONTEXTO DA APLICAÇÃO DA PROPOSTA

Esta proposta de ensino foi desenvolvida para alunos do nível V do curso de graduação Licenciatura Plena em Física da Universidade de Passo Fundo (UPF), situada na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, instituição da qual a autora deste trabalho fez parte do quadro de professores, atuou como professora na disciplina de Estatística, no ano de 1998, nas cadeiras de Ciências Físicas I, Ciências Físicas II e Prática de Ensino da Física I, durante os anos de 2002 e 2003. A instituição possui um total de quase vinte mil alunos, divididos em 51 cursos de graduação, 45 de especialização, cinco mestrados institucionais e um doutorado institucional. Ao todo, são 1.202 professores e 1.053 funcionários. São seis *campi*, instalados nas cidades de Casca, Carazinho, Lagoa Vermelha, Sarandi, Soledade e Palmeira das Missões. Além disso, a universidade conta com o Centro de Ensino Médio Integrado UPF, que possibilita aos estudantes do ensino médio e dos cursos técnicos um aprendizado de qualidade, apoiado em toda infra-estrutura que a universidade proporciona. Na Figura 1 é apresentada uma foto do pórtico da entrada principal do *campus* central da universidade em Passo Fundo e da fachada do Instituto de Ciências Exatas e Geociências (ICEG), onde atualmente funciona o curso de Física. A área de Física, conta, atualmente com 28 professores e possui seis laboratórios, assim distribuídos: Laboratório de Física Aplicada (Figura 2), Laboratório de Eletricidade e Magnetismo (Figura 3), Laboratório de Preparação (Figura 4), Laboratório de Ótica (Figura 5), Laboratório de Mecânica (Figura 6) e o Laboratório de Ferramenta e Preparação (Figura 7), todos com boa disponibilidade de

recursos pedagógicos, dispoindo de armários para guardar materiais e equipamentos que permitem a realização de diferentes experimentos durante as aulas. Além disso, os laboratórios são mobiliados de forma a possibilitar o trabalho dos alunos em grupos, e os professores que os utilizam contam com o apoio de laboratoristas, que disponibilizam com antecedência o material a ser utilizado nas aulas.



Figura 1 — Acima o pórtico da entrada principal da universidade. Abaixo a entrada do IPEG.



Figura 2 — Laboratório de Física Aplicada



Figura 3 — Laboratório de Eletricidade e Magnetismo



Figura 4 — Laboratório de Preparação



Figura 5 — Laboratório de Ótica



Figura 6 — Laboratório de Mecânica



Figura 7 — Laboratório de Ferramenta e Preparação.

Encontram-se também à disposição dos professores 14 laboratórios de informática, equipados com uma média de vinte computadores e um projetor multimídia e, por laboratório (a Figura 8 ilustra um desses laboratórios). Além disso, as salas de aulas tradicionais possuem

cabos para entrada de internet, retroprojetores de lâminas e multimídias à disposição dos professores.



Figura 8 — Laboratório de Informática

A partir desse breve relato, é possível verificar o bom potencial que a Universidade de Passo Fundo nos proporcionou durante a implementação do curso proposto. No entanto, encontramos algumas dificuldades significativas na efetivação do curso, impostas por circunstâncias que fugiram inteiramente ao nosso controle, que detalharemos no capítulo referente à avaliação dos resultados.

A proposta de curso foi implementada numa turma do V nível do curso de Física, com um total de 21 alunos (a turma pode ser visualizada parcialmente na Figura 9). A escolha da turma foi realizada aleatoriamente, tratando-se, entretanto, de uma turma de futuros professores de ensino médio de física. A maioria desses estudantes já tinha tido contato com os conceitos da ótica ondulatória, que é o pré-requisito necessário para a implementação do curso proposto, baseado na exploração das analogias existentes entre a mecânica ondulatória e a ótica ondulatória.



Figura 9 — Alunos do V nível do curso de Física da UPF

4.2. A ELABORAÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL

Consideramos como marco inicial de elaboração do curso o momento em que a idéia inicial passou a se formar em nosso pensamento, e não podemos deixar de mencionar que essa escolha teve forte influência das aulas de Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I, ministradas pela professora Dr^a. Ileana Maria Rosa Greca⁷.

A elaboração do material instrucional levou em conta alguns aspectos detectados durante a pesquisa que realizamos sobre assuntos relacionados à cursos introdutórios de mecânica quântica e foi norteadada pelo referencial teórico apresentado no capítulo 3. O material produzido e utilizado no desenvolvimento desta proposta é composto de teste de conhecimento, questionários, textos e roteiros das atividades virtuais.

Nossa intenção foi elaborar uma proposta para a inserção da mecânica quântica no ensino médio através de um curso que privilegiasse uma abordagem conceitual. Além disso, a seleção de conteúdos de mecânica quântica introduzidos no curso privilegiou as leis mais

⁷ A disciplina de Tópicos de Física Moderna e Contemporânea ocorreu no primeiro semestre do ano de 2004, O esboço inicial da proposta teve início com uma monografia solicitada pela professora como trabalho de conclusão da disciplina.

gerais e os conceitos mais fundamentais, reduzindo-se ao mínimo o dispêndio de tempo com a abordagem da evolução histórica, de alguns tópicos tradicionais da fenomenologia relacionada à mecânica quântica e da realização de cálculos matemáticos.

Foram abordados alguns temas que julgamos de maior interesse para serem inseridos num primeiro contato dos alunos com a mecânica quântica. Também foi inserido um tópico de revisão da ótica ondulatória. O conjunto dos tópicos selecionados foi disposto na seguinte ordem:

- O mundo macroscópico e o mundo microscópico;
- Objetos clássicos e objetos quânticos;
- Elétrons e fótons;
- Revisão da ótica ondulatória
 - Polarização
 - Difração
 - Superposição linear
 - Interferência
- A experiência da dupla fenda e a natureza ondulatória da luz
 - Um pouco da história da luz
 - O experimento de Young
- A experiência da dupla fenda e a natureza corpuscular da luz
- Dualidade onda-partícula para a luz: onda eletromagnética $\times$ feixe de fótons;
- A experiência da dupla fenda com feixe de elétrons;
- A função de onda e a natureza probabilística da teoria quântica.

4.3. RELATO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL

A seguir, relataremos de que forma foram implementadas as atividades planejadas. Faremos uma descrição pormenorizada do modo como foram desenvolvidas as atividades em cada uma das aulas, a fim de proporcionar uma visão mais detalhada da proposta colocada em prática.

O curso foi aplicado em sala de aula no período de 19 de maio de 2006 a 30 de junho de 2006, num total de seis encontros semanais com quatro horas-aula cada, sempre às sextas-feiras, no horário das 19h20min às 22h30min. A seguir estão detalhados os assuntos envolvidos na proposta, agrupados e ordenados cronologicamente na forma como foram trabalhados.

4.3.1. Primeira aula

4.3.1.1. Pré-teste

Para que pudéssemos implementar um curso introdutório à mecânica quântica, mesmo já tendo em mente os conteúdos que gostaríamos de trabalhar e conscientes de que a instrução formal do conteúdo não tinha sido passada aos alunos, fez-se necessário saber o que o público-alvo já conhecia sobre o tema. Conforme mencionado no capítulo 3, de acordo com a teoria piagetiana, um dos fatores de maior importância na busca por uma aprendizagem significativa é o fato de a aprendizagem poder ser descrita adotando-se como ponto de partida os esquemas de assimilação que o sujeito já utiliza. Dessa forma, com o objetivo de verificar as concepções prévias e/ou os esquemas de assimilação dos alunos com relação aos conceitos, elaboramos um pré-teste (Apêndice A), que foi aplicado nas primeiras horas-aulas do primeiro encontro.

Com base nesse levantamento, fizemos algumas adaptações no material didático de apoio e traçamos algumas estratégias de ensino a serem utilizadas no decorrer do curso, de forma a contemplar da melhor maneira possível a introdução correta dos conceitos fundamentais da mecânica quântica, de uma forma sistematizada, atraente e não cansativa. A partir da aplicação desse teste e também de conversas informais que tivemos com os alunos, verificamos que um número significativo deles não tinha tido acesso, de fato, ao conteúdo de ótica ondulatória. Mesmo estando matriculados no V nível do curso de Física, havia na turma alunos que, em realidade, ainda freqüentavam também os níveis II e III, os quais não exigiam pré-requisito da ótica ondulatória para cursar a disciplina de Didática da Física; por essa razão, podiam freqüentar os níveis citados concomitantemente com o nível V. Então, nesse estágio do nosso trabalho, optamos por inserir no material didático de apoio o item relacionado à revisão da ótica ondulatória, que não estava previsto na proposta original.

4.3.1.2. Mundo macroscópico e mundo microscópico

Ainda na primeira aula, após a aplicação do teste de conhecimento, iniciamos efetivamente a aplicação da proposta. Os alunos receberam o material referente aos tópicos 1 (Mundo microscópico e mundo macroscópico), 2 (Objetos clássicos e objetos quânticos) e 3 (Elétrons e fótons), que se encontram no Apêndice B. O início do trabalho deu-se com a projeção da imagem do espectro eletromagnético com o canhão multimídia (Figura 1 do Apêndice B), no qual localizamos a faixa correspondente aos comprimentos de onda da luz visível, a fim de que os alunos pudessem compreender o motivo pelo qual não podemos “ver” um átomo. A partir daí foram questionados e motivados para que dessem alguns exemplos de objetos microscópicos e macroscópicos, os quais foram sendo anotados no quadro. Em seguida, passamos a projetar outras imagens, como, por exemplo, a imagem da molécula do DNA humano (Figura 2 do Apêndice B), com o objetivo de provocar um desequilíbrio em alguns exemplos que eles haviam citado anteriormente. Por exemplo, o fato de um vírus ou uma bactéria serem considerados objetos macroscópicos no contexto da física quântica.

Tendo sido citados vários exemplos de objetos microscópicos e macroscópicos, passamos a fazer uma comparação de algumas grandezas com o tamanho semelhante ao de um átomo, (Tabela 1 do Apêndice B). Tratamos também de salientar algumas curiosidades referentes aos átomos, tais como o quanto são incrivelmente pequenos e numerosos. O objetivo dessa breve introdução foi relacionar os esquemas de assimilação espontâneos, já utilizados pelos alunos, com os esquemas de assimilação que desejávamos ensinar, chegando, assim, às duas escalas de tamanho: a escala macroscópica e a escala microscópica.

Feito isso, passamos a apresentar as diferenças relevantes entre o mundo macroscópico e o mundo microscópico, destacando as formas segundo as quais os fenômenos pertencentes aos mundos macroscópicos e microscópicos são descritos. A diferença fundamental que tentamos deixar evidente é que o mundo macroscópico é descrito pela física clássica, que trabalha com duas categorias de fenômenos: partículas que evoluem no tempo de acordo com as leis de Newton e ondas eletromagnéticas que evoluem no tempo de acordo com as leis de Maxwell do eletromagnetismo; por outro lado, o mundo microscópico não obedece às leis da física clássica, e, sim, às leis da física quântica.

Com o intuito de despertar curiosidade nos alunos a fim de que se predispusessem ao aprendizado, fizemos, inicialmente, uma pequena abordagem histórica, porém não uma abordagem histórico-factual que não é a abordagem empregada no nosso material instrucional. Foi tão-somente uma breve introdução fenomenológica a algumas das anomalias mais relevantes encontradas na física clássica durante, principalmente, a segunda metade do século XIX (entre elas o problema da radiação do corpo negro e o da instabilidade do modelo atômico de Rutherford para o átomo de hidrogênio), no sentido de situar o nascimento da física quântica como decorrente dessas anomalias. Fizemos, então, uma explanação detalhada do problema da radiação de corpo negro, com ajuda da projeção do gráfico do seu espectro de emissão (Figura 4 do Apêndice B). Nesta atividade, enfatizamos que as respostas ao problema, dadas pelos físicos clássicos da época, não descreviam corretamente, sequer do ponto de vista qualitativo, os resultados experimentais disponíveis, e que Planck, ao propor uma nova relação matemática, conseguiu, finalmente, resolver o problema e obter uma descrição matemática correta dos resultados experimentais.

A relação proposta por Planck em 1900, $E = h.f$, foi apresentada aos alunos juntamente com a constante que levou o seu nome. A partir dela, fizemos alguns comentários buscando exemplos que esclarecessem aos alunos o que significa dizer que a energia é quantizada. Além de usar como exemplo de quantização o da carga elétrica, também fizemos uma analogia com o valor de um centavo em relação à nossa moeda nacional. Foi deixado claro também para os alunos que a idéia da quantização de energia proposta por Planck não foi aceita inicialmente, ao contrário, essa aceitação somente começou a se dar a partir da interpretação proposta por Einstein para o efeito fotoelétrico. Embora diferente da interpretação de Planck para a idéia de quantização de energia (eletromagnética), o uso que Einstein fez da relação de Planck permitiu-lhe resolver a “anomalia” constituída pelo efeito fotoelétrico por meio de um modelo físico muito simples. Como consequência natural, fez-se importante, neste momento, abordar o conceito de fóton como o *quantum* de radiação eletromagnética.

Essa rápida abordagem teve como objetivo mostrar que foi a partir dos trabalhos pioneiros de Planck e de Einstein, no início do século XX, que os físicos foram gradativamente aceitando como realidade física as novas idéias de quantização e do fóton como o *quantum* da radiação eletromagnética, e entendendo que isso decorria do fato de que essas novas noções permitiam resolver de maneira muito “simples” (pelo menos do ponto de

vista matemático-formal) as anomalias com as quais os físicos clássicos se deparavam, juntamente com a idéia de que as anomalias não podiam ser explicadas com base na física do mundo macroscópico, ou seja, de que o mundo microscópico não pode ser adequadamente descrito pela física clássica.

4.3.1.3. Objetos clássicos e objetos quânticos

Feitas as principais distinções entre o mundo macroscópico e o microscópico, procuramos tornar os estudantes conscientes de que a mecânica quântica está além do limite macroscópico, sendo descrita por leis físicas muito diferentes das da física clássica. Por outro lado, a mecânica quântica fornece os mesmos resultados que a mecânica clássica para objetos macroscópicos, isto é, aplicada a objetos macroscópicos, ela fornece resultados iguais aos obtidos por meio da mecânica clássica. A recíproca, entretanto, não é verdadeira. Passamos, então, a nos referir como objetos clássicos aqueles que constituem o mundo macroscópico e, como objetos quânticos, os que constituem o mundo microscópico.

O objetivo deste tópico foi ressaltar as diferenças fundamentais entre a maneira como são definidos os estados dos objetos quânticos e dos clássicos. Iniciamos o tópico com o seguinte questionamento direcionado aos alunos: Como conhecemos o estado quântico de um sistema? Como nossa pergunta estava direcionada ao estado quântico, para o que os alunos supostamente ainda não conheciam a resposta, permitimos que eles utilizassem alguns esquemas mentais que já possuíam, referentes aos conceitos de estado clássico de um sistema, como o significado de sistema físico, grandezas físicas, estado mecânico de um sistema macroscópico, estado termodinâmico de um sistema macroscópico, propriedades dinâmicas de um sistema e observáveis compatíveis. Juntamos todas as considerações feitas por eles e passamos a destacar as diferenças entre um estado clássico e um estado quântico. O enfoque principal dado a esse tópico foi que, para os objetos microscópicos, nem sempre podemos considerar um conjunto de grandezas físicas ou observáveis quaisquer como simultaneamente bem definidas, ao contrário dos objetos clássicos, ou seja, na mecânica quântica nem todos os observáveis são sempre compatíveis entre si. Nesta mesma aula, utilizamos o exemplo de que não podemos determinar simultaneamente a posição e o *momentum* linear para um elétron, preparando os alunos para quando fôssemos trabalhar mais detalhadamente o assunto, porém deixando bem claro que isso não é uma decorrência de imprecisões em nossos instrumentos, mas constitui uma limitação intrínseca à natureza dos objetos quânticos.

Após analisadas as diferenças fundamentais entre os objetos clássicos e quânticos, o próximo passo foi concluir com os alunos que, em razão dessas diferenças, a maneira como são definidos os estados dos objetos quânticos é inteiramente diversa da maneira como isso é feito na física clássica. Conseqüentemente, o movimento de objetos macroscópicos e o de objetos microscópicos não podem ser regidos pelas mesmas leis e pelas mesmas equações. Aproveitando essa constatação, inferida pelos próprios alunos, fizemos a apresentação da equação de Schrödinger, apenas para que eles a conhecessem, mas sem realizar qualquer tipo de dedução ou cálculo com ela porque não faz parte do objetivo do nosso trabalho este tipo de atividade. Porém, mesmo assim, julgamos importante que, já a essa altura do curso, os alunos soubessem que a entidade matemática que descreve o estado de um sistema quântico é sua função de onda, que é uma solução da equação de Schrödinger, a qual contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve (ela é o próprio estado do sistema quântico).

Entretanto, mesmo fornecendo todas as informações de que se pode dispor sobre o estado quântico do sistema, o número delas é limitado, e essas limitações são inerentes à natureza, não se tratando de limitações tecnológicas. Para exemplificar, voltamos novamente a usar o exemplo do sistema formado por um único elétron, para o qual ela é uma função de posição e do tempo, mas não do *momentum*. Nesse tópico, deixamos para serem tratados mais adiante aspectos muito importantes acerca da função de onda, como caráter conclusivo do curso. Finalmente, chegamos às respostas à pergunta inicial: para conhecer o estado quântico de um sistema é necessário determinar um conjunto mínimo de observáveis associados ao sistema que sejam compatíveis entre si.

4.3.1.4. Elétrons e fótons

A fim de evitar falsas analogias que possam vir a se incorporar a estrutura cognitiva dos nossos alunos, tornando-se obstáculos epistemológicos, neste tópico fizemos uma rápida comparação entre elétrons e fótons. De forma muito simples, destacamos as propriedades que ambos possuem em comum e também enfatizamos as diferenças relevantes entre eles.

A nossa principal preocupação neste tópico foi deixar claro para os alunos que não é inteiramente correto conceber os elétrons como “bolinhas em rotação”, embora, baseada no mundo macroscópico, essa imagem nos seja a mais familiar e “confortável”. Na concepção

bachelardiana, esse é um dos obstáculos que podem, inevitavelmente, surgir da relação dos alunos com o objeto de conhecimento, sendo necessário superá-lo a fim de propiciar o desenvolvimento do conhecimento individual. Mesmo que os elétrons não sejam como as “bolinhas” do mundo clássico, realmente possuem um tipo de rotação, que é uma característica intrínseca dos mesmos, isto é, todos os elétrons giram da mesma forma, sem importar a direção em que tal rotação é medida, e o módulo de sua quantidade de movimento de rotação é sempre o mesmo para todos os elétrons encontrados na natureza. O *spin*, ou *momentum angular intrínseco*, está relacionado com a rotação dos elétrons em torno de si mesmos e tem o mesmo módulo para todos os elétrons. Dependendo do sentido de rotação, entretanto, um elétron pode ter uma componente de seu *spin* orientada para cima (*spin up*) ou para baixo (*spin down*). Assim como os elétrons, um fóton também possui um *spin*. A importância desse tópico se justifica-se pelo fato de que em toda a implementação do curso utilizamos os elétrons e os fótons como protótipos de objetos quânticos elementares, ou seja, desprovidos de uma estrutura interna.

O principal objetivo da aula introdutória, portanto, foi desestabilizar as estruturas cognitivas do aluno no que se refere às concepções clássica, com o intuito de que, ao lhe ser apresentada a mecânica quântica, ocorra uma assimilação mais significativa dos conceitos envolvidos, uma vez que esses não são perceptíveis diretamente a partir do cotidiano de nossos alunos. É importante que as estruturas cognitivas dos alunos tornem-se mais aptas a mudanças e que, ao se depararem com os conceitos da mecânica quântica, eles já tenham se questionado sobre a validade da física clássica para descrever os fenômenos do mundo microscópico. A partir disso, numa perspectiva piagetiana, esperávamos que surgissem nos alunos uma motivação para que, sistematicamente, as estruturas de pensamento acerca do assunto evoluíssem, ocorrendo uma acomodação das novas estruturas.

4.3.2. Segunda aula

4.3.2.1. Revisão da ótica ondulatória

Como registramos anteriormente, a necessidade deste tópico de revisão surgiu após termos verificado que alguns alunos não haviam tido acesso a tal conteúdo. Optamos, então, por trabalhar alguns conceitos que julgamos necessários, entre eles, o princípio de Huygens, a difração, a superposição linear, a interferência e a polarização. Antes de abordar o princípio de Huygens, porém, aproveitamos para lembrar-lhes quais são as características ou

propriedades fundamentais de uma onda, tais como comprimento de onda, amplitude, cristas e vales. Fizemos isso mostrando a representação de uma onda projetada com o canhão multimídia (Figura 5 do Apêndice B).⁸ Em seguida, apresentamos as idéias de Huygens, destacando que as frentes de onda que se espalham, quando originadas de uma fonte pontual, podem ser consideradas como a superposição das cristas de pequenas ondas secundárias que, após um curto intervalo de tempo, formam uma nova superfície. Quando as ondas formadas estão a uma distância muito longa da fonte, podem-se considerá-las como que formando uma superfície aproximadamente plana. As ondas planas podem ser geradas, por exemplo, dentro de uma cuba retangular contendo água, onde é feito um movimento com uma régua. Projetamos algumas imagens de ondas planas passando por uma abertura (Figura 8 do Apêndice B) e aproveitamos para introduzir o conceito de difração, que foi explicado pelo princípio de Huygens.

Um dos aspectos que tentamos evidenciar no fenômeno da difração foi o fato de que a abertura do obstáculo pelo qual a onda passa precisa ter dimensões comparáveis ao comprimento de onda e que, quanto menor for essa abertura, mais aparente será a difração (embora a difração não esteja restrita a fendas estreitas). Para que os alunos não pensassem que difração ocorre apenas com ondas formadas na água, em vez de ser um fenômeno comum a todos os tipos de ondas, utilizamos alguns outros exemplos, como o das ondas sonoras. Além disso, usamos uma simulação computacional, através de um *applet* disponível na internet⁹, que demonstra a difração para a luz através de uma fenda única. A simulação foi projetada com o canhão multimídia, explorando-se com os alunos todas as opções que o *applet* oferecia. Basicamente, o *applet* possibilitou-nos trabalhar com diferentes tamanhos para a abertura do obstáculo (fenda) e, também, a troca de cores (comprimentos de onda) para a luz; outro recurso muito importante proporcionado foi a visualização do gráfico da distribuição da luz difratada através da fenda única.

A fim de que os alunos tivessem condições de assimilar o conceito de interferência, foi necessário trabalhar com eles o princípio da superposição de ondas. Para isso, retomamos com eles o significado de ondas em fase e ondas fora de fase. Iniciamos essa parte da revisão

⁸ Todas as imagens projetadas encontram-se nas figuras que fazem parte da do Apêndice B, juntamente com o texto de cada aula.

⁹ Está disponível em: <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/difracao/difracao.htm>

com um questionamento direcionado aos alunos: “Uma onda pode ocupar o mesmo espaço que outra?” Num primeiro momento, a resposta debatida entre eles, foi negativa. Então, com o intuito de que essa idéia prévia fosse reformulada, elaboramos outras questões para provocar um desequilíbrio na concepção inicial dos alunos. Utilizamos alguns exemplos como o fato de jogarmos duas pedras na água e observarmos o padrão formado. Aos poucos, os alunos foram tomando consciência de que é possível, sim, que duas ou mais ondas passem simultaneamente pela mesma região do espaço. Como consequência, os deslocamentos provocados por elas se somam em cada ponto para formar uma onda resultante. Esse é o princípio da *superposição de ondas*, para cuja visualização utilizamos, novamente, um *applet* disponível na internet¹⁰. A demonstração foi realizada com o canhão multimídia, envolvendo a manipulação de todos os recursos oferecidos pelo *applet*, o qual serviu para ilustrar a propagação de dois pulsos de ondas, possibilitando a inversão do sentido de sua propagação e a observação dos efeitos que o encontro deles produz. Pode-se notar também que o deslocamento resultante em cada um dos pontos, em qualquer instante, é igual à soma dos deslocamentos que teriam sido produzidos pelos dois pulsos de maneira independente, ou seja, se apenas cada um deles estivesse presente. O simulador disponibiliza um controle para a inversão dos pulsos, para que o aluno observe que o princípio da superposição também é válido para pulsos fora de fase. Após o encontro dos pulsos, eles passam a se propagar como se nada tivesse acontecido, reassumindo sua forma original.

O fenômeno da interferência foi, então, abordado como uma combinação de ondas que se refere somente à amplitude da onda, não à propagação. A superposição de pulsos de onda em concordância (em fase) é denominada *interferência construtiva*, e a superposição de pulsos de onda em defasagem (fora de fase), *interferência destrutiva*. A interferência é uma característica específica de qualquer movimento ondulatório. Ainda nesta parte da revisão, abordamos outra importante característica do movimento ondulatório: a da coerência ou não entre duas fontes puntiformes de ondas. Duas fontes de onda são consideradas *coerentes* se a diferença entre suas fases não mudar com o tempo enquanto estão sendo emitidas, em outras palavras, para serem fontes coerentes, é preciso que mantenham constantes as diferenças de fases entre si, instante a instante.

¹⁰ Está disponível em: <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/superposicao/superposicao.htm>

Contrariamente à difração e à interferência, que se aplicam a qualquer tipo de onda, a polarização é uma propriedade exclusiva das ondas transversais. Para finalizar, a revisão, abordamos os conceitos de ondas longitudinais e de ondas transversais utilizando alguns exemplos do cotidiano dos alunos, e, após nos detemos especificamente na questão da polarização da luz. O objetivo foi que os alunos compreendessem que a luz emitida pelo Sol, por lâmpadas comuns, ou a luz refletida pelos objetos é não-polarizada ou apenas parcialmente polarizada (no caso da luz refletida por objetos), porém podem vir a ser polarizadas se as fizermos atravessar através de filtros polarizadores de luz (filtros polaróides). Para isso, tratamos de esclarecer a diferença entre polarização linear e polarização circular da luz. Polarizar linearmente a luz significa fazer o campo elétrico da onda luminosa da luz oscilar num mesmo plano enquanto se propaga; polarizar circularmente a luz significa fazer o campo elétrico da onda luminosa da luz girar em torno de um eixo, mantendo sua amplitude constante, ou seja, a direção de polarização da onda é a direção de oscilação de seu campo elétrico.

Concluída essa revisão, que envolveu alguns dos aspectos mais relevantes para o contexto do nosso trabalho, julgamos que, a partir daí, os alunos estavam aptos a interpretar o resultado do experimento de Young, que foi o próximo tema trabalhado no curso.

4.3.2.2. A experiência da dupla fenda e a natureza ondulatória da luz

Optamos por dividir este tópico em duas partes: em primeiro lugar, traçamos um breve histórico da história científica da luz com a finalidade de compreender a importância que o resultado do experimento de Young trouxe para esse contexto; a segunda parte refere-se ao famoso experimento de Young com uma fenda dupla.

Ao abordarmos o experimento de Young, inicialmente projetamos o esquema do arranjo experimental (Figura 9 do Apêndice B). O primeiro aspecto discutido com os alunos foi o fato de que a luz usada por Young era *monocromática*, pois, se ele usasse luz com vários comprimentos de onda (policromática), quando fossem difratadas pelas fendas, as franjas escuras produzidas por interferência para um determinado comprimento de onda ficariam superpostas às franjas claras produzidas por outros comprimentos de onda, o que faria com que o padrão de franjas claras e escuras não fosse notado. Outro aspecto importante analisado em sala de aula foi o de que a fonte luminosa deve ser coerente para que o experimento da

fenda dupla revele padrões de interferência. Como esse aspecto já tinha sido abordado no tópico de revisão da ótica ondulatória, só realizamos a aplicação dele ao experimento de Young para justificar o porquê das fontes usadas, que, além de monocromáticas, devem, também, ser coerentes.

Depois de analisados todos esses aspectos iniciais com a ajuda da projeção do arranjo experimental com o canhão multimídia, passamos a acompanhar os fenômenos envolvidos durante o experimento. A fonte de luz monocromática ilumina a fenda S_0 do anteparo A , onde ela é difratada e espalhada lateralmente; ao chegar ao anteparo B , a luz é dividida em dois feixes e novamente difratada pelas fendas S_1 e S_2 , seguindo, então, para uma tela branca, C , onde se combinam e dão origem a um padrão de franjas claras e escuras alternadas, típico de interferência ondulatória. Esse padrão característico é conhecido pelo nome de *padrão de interferência*. Nesta etapa do trabalho, solicitamos aos alunos que formulassem algumas respostas para a seguinte pergunta: do que depende a intensidade luminosa em cada ponto da tela C ? Em outras palavras, como são formadas as franjas claras e as franjas escuras do padrão de interferência observado na tela?

Para auxiliá-los, propusemos uma atividade na qual, juntos, traçamos o caminho de dois dos raios, um que sai da fenda 1 e outro que sai da fenda 2 (Figura 11 do Apêndice B). Em seguida, com cálculos matemáticos bastante simples, usando a trigonometria do triângulo retângulo, chegamos à equação que nos fornece a diferença de caminho sofrida pelos raios (responsável pelas franjas claras e escuras). Concluímos a atividade mostrando que, no anteparo C , os pontos claros são aqueles onde as ondas sofrem interferência construtiva, o que ocorre quando as ondas provenientes das duas fendas chegam ao anteparo com fases iguais (em fase). O conjunto desses pontos constitui uma franja clara. Em outros pontos, as ondas sofrem interferência totalmente destrutiva, o que ocorre quando as ondas ali incidentes estão completamente fora de fase (ou seja, com uma diferença de fase igual a π radianos). O conjunto desses pontos forma uma franja escura.

Finalizamos este tópico mostrando aos alunos que o experimento de Young foi uma contribuição decisiva para a história científica da óptica, uma vez que foi a partir desse experimento que a teoria ondulatória da luz passou a predominar sobre a teoria corpuscular de Newton, tornando-se alicerce teórico para a ótica ondulatória desenvolvida durante o século XIX.

4.3.3. Terceira aula

4.3.3.1. Atividade virtual – parte I

A terceira aula ocorreu inteiramente no laboratório de informática, onde os alunos se organizaram em duplas para realizarem as atividades propostas. O objetivo da atividade foi realizar uma exploração detalhada dos recursos oferecidos pelo *software*, considerado nesse contexto como o objeto de estudo a ser manipulado. O fato de a atividade ter sido feita em duplas corrobora com a perspectiva de Piaget, o qual afirma que a interação social desempenha um papel significativo na busca da aprendizagem. Durante as atividades propostas, os alunos conversaram, dividiram experiências entre si e argumentaram a respeito dos fenômenos simulados; também houve livre interação com a professora. Numa concepção construtivista, esses fatores são muito importantes para a construção do conhecimento.

Inicialmente, os alunos foram apresentados ao *software* Doppelspalt, que já estava instalado em seus computadores. Eles abriram a tela principal e aprenderam os passos iniciais, acompanhando a demonstração feita por nós através da projeção com o canhão multimídia. Também entregamos aos alunos um roteiro de atividades, para que eles pudessem começar a manipular o *software* imediatamente. A primeira parte desse roteiro (Apêndice C) continha instruções gerais a respeito do funcionamento do *software*, com figuras que auxiliam o seu uso. Após as instruções, que têm o objetivo de ensinar a usar o simulador, passamos para as atividades propostas.

A primeira atividade proposta envolveu exclusivamente partículas clássicas. O desenvolvimento dessa atividade consistiu em fazer o aluno utilizar como fonte “balas de metralhadoras” para simular o experimento das duas fendas. Em primeiro lugar, eles foram motivados a realizar o experimento com apenas uma das fendas abertas; depois, com a outra e, depois, com as duas fendas abertas simultaneamente. Em cada uma das observações, eles deveriam expressar suas descrições, observações, explicações, opiniões por escrito. Deixamos claro para os alunos que não seriam aceitas atividades sem o devido desenvolvimento, ou com respostas do tipo “não sei”. Novamente solicitamos a realização da simulação para que fosse feita a observação, junto com um esboço do padrão gráfico visto na tela.

Para concluir a primeira atividade, pedimos que os alunos extraíssem suas conclusões com base nas descrições feitas por eles, destacando as características que

considerassem mais importantes das partículas clássicas (neste caso, balas de metralhadoras). Para justificar o que foi observado nos itens anteriores, utilizamos um exemplo numérico no qual consideramos um valor aproximado para a massa de uma bala de metralhadora e para a sua velocidade. Utilizando a relação de De Broglie, os alunos efetuaram o cálculo do comprimento de onda para as balas e, depois, usaram esse valor para justificar por que as balas não apresentavam um padrão de difração na tela.

A segunda atividade proposta iniciou solicitando-se que os alunos utilizassem como fonte um *spray* colorido. A primeira pergunta da atividade questionava os alunos a respeito de se as gotas de um *spray* seriam caracterizadas como partículas clássicas. Retornando à abordagem inicialmente feita a respeito do mundo macroscópico e do mundo microscópico, eles deveriam responder e justificar a questão. A partir daí as atividades foram seguindo os mesmos passos das atividades feitas com balas de metralhadoras.

Ao final, juntamos as conclusões da primeira atividade (com balas de metralhadoras) e da segunda atividade (com *spray*) com o objetivo de formular uma atividade para provocar nos alunos o conflito cognitivo, como ponto de partida para eles reorganizarem suas estruturas cognitivas para a aprendizagem. Perguntamos aos estudantes se as observações feitas nas duas atividades tinham alguma semelhança com o que se observava no experimento de Young, feito com ondas. Os alunos deviam justificar por que não se observam padrões de interferência na primeira atividade e nem na segunda, uma vez que a mecânica quântica descreve toda a matéria. Todo o material foi entregue para a professora no final da aula.

4.3.4. Quarta aula

4.3.4.1. Retomada das atividades virtuais – parte I

Iniciamos a quarta aula fazendo uma retomada das atividades propostas pelo roteiro exploratório da aula anterior. Para isso, usamos o canhão multimídia, com o qual foram refeitas todas as atividades com o simulador. Utilizamos para essa revisão o recurso que o *software* nos oferece de “fotografar” (gravar) os padrões observados na tela. Depois de gravarmos os padrões para as fendas abertas separadamente, primeiro uma e depois a outra, gravamos o padrão observado quando as duas fendas estão abertas. Comparando os três registros obtidos, tratamos de convencer os estudantes acerca da seguinte conclusão: quando as duas fendas estão abertas (para objetos clássicos), o padrão observado na tela é,

simplesmente, a soma algébrica (superposição) dos dois padrões individuais observados quando cada uma das fendas estava aberta sozinha. Portanto, não existe interferência neste caso e a difração não é observada, pois o comprimento das balas é muito pequeno em relação à largura das fendas usadas. A intensidade uniforme na região da tela que fica diretamente à frente da fenda é consequência do fato de que as franjas de difração ficam tão juntas, “amontoadas”, que começam a se superpor. Essa intensidade vai diminuindo rapidamente a zero quando se sai dessa região. Representamos no quadro o padrão que estava sendo visualizado na tela do *software*, com o esquema da Figura 10, que foi usado por Nussenzveig (2002).

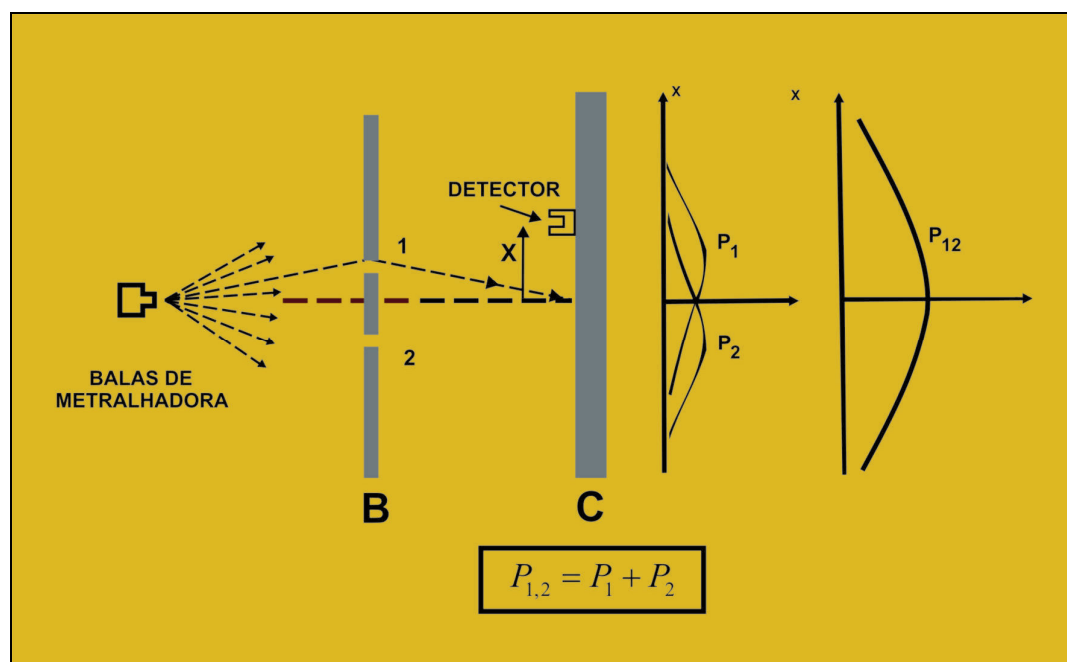


Figura 10 — Experimento de Young com partículas clássicas

Na figura, P_1 representa a *distribuição* ou *densidade* de probabilidade correspondente à situação em que apenas a fenda 1 está aberta; P_2 representa a distribuição ou densidade de probabilidade para a situação em que apenas a fenda 2 está aberta, e $P_{1,2}$ representa a densidade de probabilidade correspondente à situação em que as duas fendas estão *simultaneamente* abertas. Com isso, a primeira parte do roteiro experimental foi concluída e passamos aos tópicos seguintes do curso.

4.3.4.2. A experiência da dupla fenda e a natureza corpuscular da luz

Este tópico foi abordado apenas em alguns aspectos mais relevantes para o curso, a fim de prover subsídios fundamentais para que os alunos fizessem com sucesso a segunda parte do roteiro experimental, que ocorreu na segunda parte dessa aula. O objetivo foi que os alunos organizassem suas idéias e esquemas mentais para posteriormente extraírem suas próprias conclusões.

Justificamos para os alunos o retorno ao experimento de Thomas Young com a finalidade de poder explicar como pode ser interpretado com a teoria quântica da luz. O modelo utilizado então não foi o de uma onda eletromagnética, mas um modelo corpuscular da luz, considerada, agora, como uma corrente de *corpúsculos de luz* ou *quanta de luz* – ou seja, um feixe de fótons. Lembramos os alunos de que, da mesma forma como havíamos feito anteriormente na abordagem do experimento de Young, com base na teoria ondulatória (luz de um único comprimento de onda, ou monocromática), para manter o paralelismo entre a situação anterior e a nova, os fótons emitidos pela fonte deveriam todos ter uma mesma energia, isto é, deveriam ser *monoenergéticos* (recordando-os da relação de Planck).

Para que os alunos compreendessem que, no modelo corpuscular, a intensidade é proporcional à energia transportada, a qual, por sua vez, é proporcional ao número de fótons incidentes, fizemos um exercício numérico no qual eles puderam verificar a relação entre o valor da intensidade luminosa e o número de fótons emitidos num determinado instante. Não avançamos mais neste tópico porque o objetivo era conduzir os alunos a chegarem às suas próprias conclusões com base na atividade de simulação. Depois disso, dirigimo-nos ao laboratório de informática.

4.3.4.3. Atividade virtual – parte II

Na segunda parte da quarta aula, iniciamos as atividades virtuais do segundo roteiro (Apêndice D). Assim como na primeira parte da atividade virtual, os alunos organizaram-se em duplas, sendo oportunizada a interação entre eles e nós. Essa atividade foi orientada por um roteiro e dividida em três partes. O desenvolvimento da primeira parte da atividade consistiu em levar os estudantes a usarem feixes de fótons (escolhendo a opção “fótons” para a fonte) para simular seus experimentos virtuais com as duas fendas. Em primeiro lugar, eles foram motivados a realizar o experimento com apenas uma das fendas aberta, escolhendo

também uma largura mínima para a mesma; em seguida, repetiram o procedimento com (apenas) a outra fenda aberta. Após um grande número de fótons já terem atingido a tela, foi solicitado que os estudantes analisassem os padrões formados e descrevessem, de forma semiquantitativa, o que fora observado. Isso foi realizado com a ajuda de gráficos e histogramas que o *software* disponibiliza, através das opções *theory result* e *evaluation*. Também foram utilizados e detalhadamente explorados nas atividades virtuais todos os recursos que são disponibilizados pelo simulador. O procedimento seguinte foi registrar as diferenças mais notáveis e relevantes observadas na atividade realizada com partículas microscópicas (os fótons) em relação à atividade na qual eles trabalharam com partículas macroscópicas (as balas de metralhadora), em ambos os casos se utilizando uma única fenda aberta. Depois o experimento virtual foi refeito, agora com as duas fendas abertas. Solicitamos então, que comparassem os resultados obtidos no momento com aqueles obtidos na atividade com partículas macroscópicas, contudo os provocamos para que explicassem o que fora observado na tela *baseando-se no que aprenderam sobre interferência de ondas*. Foi solicitado também que identificassem o comportamento corpuscular e o comportamento ondulatório dos fótons a partir do padrão formado na tela. Nesse momento, aproveitamos para ilustrar a noção da dualidade onda-partícula por meio dessa observação.

O objetivo da segunda atividade foi comprovar o fato de que não podemos separar completamente os fenômenos de difração numa fenda e de interferência entre duas fendas. Para isso, antes de o roteiro experimental ser trabalhado em aula, fizemos uma pequena introdução, distribuída impressa juntamente com o roteiro, justificando tal fato. Esclarecemos aos alunos que os fenômenos da difração e da interferência não podem realmente ser separados de forma completa. Explicamos que franjas de difração são originadas da interferência entre raios de luz provenientes de lugares diferentes de uma *mesma* fenda e que franjas de interferência são originadas da interferência entre os raios luminosos provenientes de fendas *diferentes*. E quando duas fendas estão abertas, esses dois tipos de franjas ocorrem simultaneamente e não podem ser separados.

Em todas as etapas desta segunda atividade foi usado o recurso de “fotografar” ou registrar os padrões obtidos, disponibilizado pelo *software*, para que os alunos fossem fazendo as sucessivas comparações com maior facilidade. Inicialmente, foi solicitado que eles usassem uma fonte de feixe de elétrons e que mantivessem apenas uma fenda aberta, com a largura mínima fornecida pelo *software*. Solicitamos também que fosse usado um valor que foi

previamente estipulado para a energia, 100 keV ¹¹. O objetivo desta etapa foi que o padrão observado fosse compreendido como um padrão de difração de fenda única: como a fenda é muito estreita, o padrão difração aparece bem espalhado e notável, levando os alunos a concluir que, quanto menor for a abertura da fenda, mais espalhado estará o padrão gerado pela difração. No caso abordado em aula, as franjas de difração eram tão largas que a franja central enchia praticamente toda a tela. A escolha do valor de energia que foi previamente estipulado corresponde, pela relação de De Broglie a um comprimento de onda de 4pm ¹². Esses valores foram escolhidos justamente para dar o efeito de preenchimento quase total da tela.

Depois das observações terem sido registradas e o padrão ter sido fotografado virtualmente, na atividade seguinte propôs-se que os alunos abrissem simultaneamente as duas fendas, mantendo a mesma fonte utilizada anteriormente e os mesmos valores que haviam sido escolhidos para a largura das fendas e para a energia. O objetivo foi que os alunos, através da comparação feita com a foto da atividade anterior, concluíssem que o padrão observado na tela é o padrão de interferência *entre duas fendas*. As franjas brilhantes de interferência ficaram localizadas na mesma posição em que estava localizada a franja de intensidade máxima do padrão de difração da atividade anterior. Isso ocorre porque a difração cria seu próprio padrão de franjas claras e escuras alternadas para cada uma das fendas, todavia quando existem duas fendas idênticas e abertas, esse padrão aparece *modulando* a intensidade das franjas do padrão de interferência entre as duas fendas, ou seja, ele é a envoltória da curva de intensidade *versus* posição na tela.

Na atividade seguinte, sugerimos que a distância entre os centros das fendas fosse aumentada para o valor máximo permitido pelo *software*. Após observarem e fotografarem os padrões obtidos, os alunos deveriam explicar a alteração produzida no padrão observado na tela pelo aumento na distância entre os centros das fendas. Como eles haviam registrado todos os padrões obtidos nas atividades anteriores, os estudantes tinham como visualizar e comparar facilmente com o padrão observado em suas telas. Isso foi feito com o objetivo de levar os alunos a confirmarem, por si mesmos, que os padrões continuavam sendo de interferência, pois permaneceram com as duas fendas abertas em seus *softwares*, porém, agora, as franjas

¹¹ O valor de 100 keV corresponde a $1,6 \cdot 10^{-14}\text{ J}$.

¹² O valor de 1pm corresponde a 10^{-12}m .

tornam-se muito próximas, como consequência do aumento da distância entre as fendas quanto maior a distância entre as fendas, mais próximas ficam as franjas. Aproveitamos essa observação para mostrar aos alunos que também podemos verificar isso com base na equação da condição para máximos. Utilizando os valores fornecidos pelo *software* e essa equação, fizemos o cálculo do ângulo θ_n (o ângulo que localiza o n -ésimo máximo). Por meio desse cálculo os alunos observaram que, aumentando a distância entre as fendas, as franjas ficam muito mais próximas, pois o valor de θ_n diminui. Novamente foi solicitado aos alunos que alterassem a distância entre as fendas, agora diminuindo a distância entre elas para o valor mínimo permitido pelo *software*. A relação entre a distância das fendas e o padrão formado foi observada e registrada novamente. Esse padrão, infelizmente, não pôde ser fotografado porque o *software* permite que se registrem apenas três fotografias, porém o novo padrão observado podia ser visualizado abaixo dos outros três, que já haviam sido fotografados. Com isso, os alunos puderam perfeitamente fazer suas comparações. A finalidade da atividade foi mostrar que, com a diminuição da distância entre as fendas, as franjas ficam muito mais afastadas e muito mais largas do que antes. Dessa forma, a franja central de interferência das duas fendas passa a ocupar praticamente toda a tela (e encontra-se dentro da franja central de difração, que é muito larga porque a largura das fendas é muito pequena). Novamente aproveitamos essa observação para mostrar aos alunos que também podemos verificar isso com base na equação da condição para máximos. Utilizando os valores fornecidos pelo *software* e essa equação, fizemos o cálculo do ângulo θ_n . Com esse desenvolvimento matemático, comprovamos a razão de a franja central de interferência ocupar praticamente toda a tela. Como o valor da distância entre as fendas diminui, o valor do θ_n aumenta, devendo as franjas ficar mais afastadas.

Para finalizar a segunda atividade, retornamos à situação em que apenas uma das fendas estava aberta, usando uma distância razoavelmente grande, para que os alunos explicassem o padrão formado neste caso. Esperávamos que eles identificassem o padrão observado como o de difração. Também foram observadas franjas laterais do padrão de difração, com baixa intensidade; agora, o padrão de difração aparecia comprimido, pois aumentamos a largura da única fenda aberta.

A terceira atividade do roteiro envolveu três exercícios interativos. Os alunos manipulavam o *software* e, em seguida, realizavam cálculos. Para o primeiro exercício,

escolhemos operar com elétrons dotados de um valor previamente estipulado para a energia, de forma que o movimento da partícula fosse não-relativístico. O objetivo do exercício era efetuar o cálculo para obter o valor do comprimento onda dos elétrons usados por meio da relação de De Broglie. Foi estipulado um valor de energia não-relativística e fornecido o valor da massa do elétron. O resultado encontrado deveria ser comparado com o valor fornecido pelo *software*. O resultado encontrado foi muito satisfatório, pois ficou muito próximo do valor fornecido pelo *software*.

O segundo exercício interativo tinha como objetivo checar a validade da fórmula da condição de máximos de interferência, utilizando os valores fornecidos pelo *software*. Para isso os alunos deveriam encontrar a distância do n -ésimo máximo lateral ao ponto central da tela. Utilizando a equação dos máximos de interferência, foi novamente calculado o valor do ângulo θ_n . Como o ângulo é bastante pequeno, foi feita uma aproximação para o valor do *seno* do ângulo, substituindo-o pelo valor da *tangente* do mesmo. Por meio, então, da fórmula da *tangente* de θ_n , calculamos a distância procurada. O resultado deveria ser comparado com o que se pode ler diretamente na escala da tela virtual do *software*. Assim, como no primeiro exercício, também foram sugeridos alguns parâmetros a serem utilizados. Os parâmetros foram escolhidos com a intenção de que fosse fácil a visualização do valor do ângulo θ_n e para que isso fosse possível, utilizamos o recurso *top* (que fornece a vista superior do arranjo do *software*), tendo-se incluído no roteiro uma foto ilustrando a situação (Figura 1 do Apêndice D).

O terceiro exercício interativo teve por finalidade comprovar o fato de que os valores de *seno*, substituídos pelo valor da *tangente*, são realmente muito próximos, e, também, conferir se o ângulo θ_n tem realmente um valor muito pequeno. Para isso, pedimos aos alunos que usassem os valores fornecidos pelo *software* para calcular, primeiramente, o valor de θ_n usando a condição de máximos de interferência, em seguida, utilizando a fórmula da *tangente*, deveriam determinar o valor do θ_n para comparar os dois resultados encontrados. Para finalizar o terceiro exercício, questionamos os alunos se sabiam explicar geometricamente o porquê de o valor de θ_n ser tão pequeno. Os cálculos e as explicações individuais dos estudantes referentes às atividades foram anotados por eles e entregues no final da aula.

4.3.5. Quinta aula

4.3.5.1. Retomada das atividades virtuais – parte II

Destacamos nesta aula alguns aspectos muito importantes para a construção dos novos conceitos. O objetivo dessa retomada foi fazer com que os alunos, ao retornarem às questões da aula anterior, conseguissem sanar dúvidas que ainda pudessem ter referentes às atividades virtuais. Utilizamos novamente o canhão multimídia para projetar figuras e explicar melhor todas as atividades propostas; desta vez, porém, os alunos não tinham em mãos o roteiro, uma vez que o haviam entregue na aula anterior.

Simulamos e projetamos com o canhão multimídia a primeira atividade com fótons, primeiro, com apenas uma das fendas aberta, depois, com ambas abertas. Destacamos as seguintes observações para a situação de uma única fenda aberta: os fótons sempre chegam à tela ao acaso, um a um, em seqüência e sempre inteiros. Se esperarmos um tempo suficientemente longo, os pontos vermelhos da tela, cada qual correspondente ao impacto de um fóton, acumular-se-ão em grande número, formando um padrão típico de difração de fenda única (com franjas laterais brilhantes e uma franja central de máximo brilho). A partir da intensidade ou da densidade de fótons na vizinhança de cada ponto da tela, podemos obter a densidade de probabilidade correspondente (módulo ao quadrado da função de onda), quando temos somente a fenda 1 aberta ($P_1 = |\psi_1|^2$), ou a probabilidade correspondente a termos somente a fenda 2 aberta ($P_2 = |\psi_2|^2$). Para as duas fendas abertas, destacamos as seguintes observações: o padrão visualizado agora é o de interferência entre as duas fendas (igual ao observado na experiência de Young); o qual *não é* simplesmente igual à soma dos padrões obtidos em seqüência, quando somente uma das fendas estava aberta ($P_{1,2} \neq P_1 + P_2$), como era o caso para partículas clássicas, por causa exatamente da interferência. O padrão observado foi feito no quadro através de um esquema como o da Figura 11.

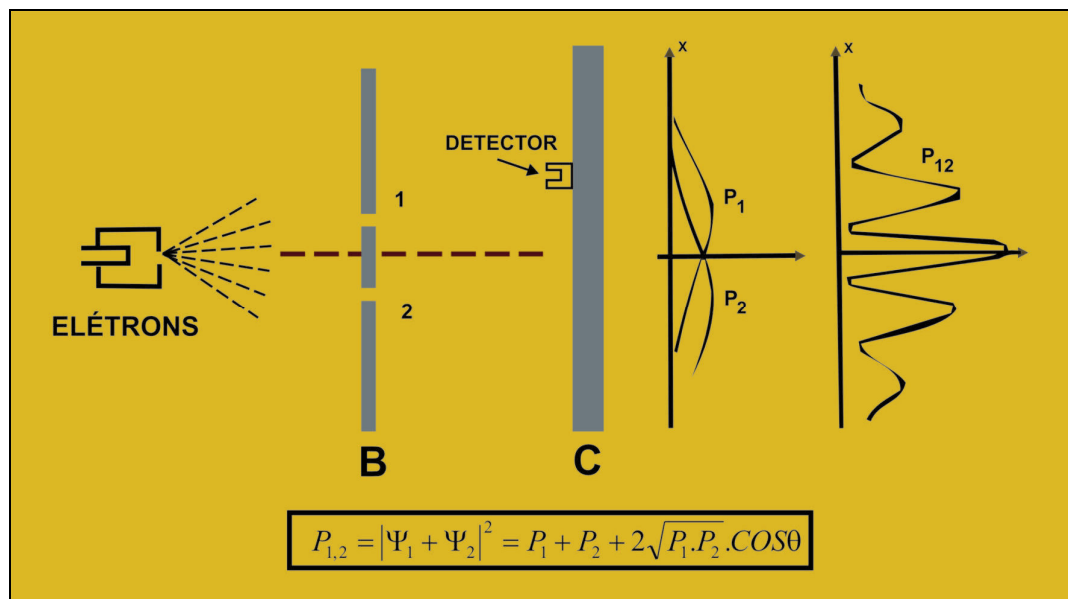


Figura 11— Experimento de Young com elétrons

Com base nessas observações, destacamos que os fótons têm comportamento corpuscular quando estão sendo emitidos pelo átomo e quando são detectados na tela e que apresentam um comportamento tipicamente ondulatório quando estão se propagando até a tela e quando interferem (sua função de onda) consigo mesmo. Um fóton não pode ser considerado completamente como partícula nem completamente como onda, mas pode apresentar tanto propriedades corpusculares quanto propriedades ondulatórias, dependendo do arranjo experimental utilizado e da grandeza ou padrão observado. Nesse sentido, pelas observações feitas nessa atividade, pudemos analisar uma característica fundamental da mecânica quântica – a *dualidade onda-partícula*.

Aproveitamos a retomada das atividades virtuais para introduzir o tópico seguinte do nosso curso: “Dualidade onda-partícula para luz: onda eletromagnética $\times$ feixe de fótons” (Apêndice B), que aborda justamente a dualidade para a radiação eletromagnética. Sob determinadas condições, a radiação eletromagnética apresenta propriedades tipicamente ondulatórias, tais como difração, interferência e polarização. Sob outras condições, porém, a radiação eletromagnética comporta-se como se fosse um feixe de partículas ou uma corrente de *partículas de luz*, os *quanta* de luz ou *fótons*. Aproveitamos também para abordar rapidamente o efeito fotoelétrico, que teve uma importante contribuição para o fato de a natureza da luz deixar de ser considerada uma entidade completamente ondulatória.

Na retomada da segunda atividade virtual, aproveitamos para trabalhar com o tópico seguinte do curso: a experiência da fenda dupla com feixe de elétrons. Refizemos, com a ajuda do canhão multimídia, todos os passos realizados no laboratório virtual e apenas destacamos os aspectos mais relevantes obtidos com a atividade proposta. O primeiro aspecto a ser destacado foi que o experimento virtual mostrou que os elétrons e outras partículas quânticas compartilham de um caráter ondulatório com o eletromagnetismo clássico. Por outro lado, as radiações eletromagnéticas compartilham com as partículas clássicas um caráter corpuscular da forma como postulado por Einstein: feixes de *pacotes de energia* concentrada formando a radiação. Os elétrons (e outras partículas quânticas) não se comportam como partículas clássicas, nem como ondas clássicas, embora, dependendo do experimento realizado, revelem possuir uma ou outra dessas características. Ainda na quinta aula, na última parte da revisão das atividades virtuais, realizamos a correção dos exercícios interativos, a qual revelou que os valores calculados estavam muito próximos dos valores fornecidos pelo *software*, fato que já tínhamos mencionado anteriormente.

Com o objetivo de provocar a curiosidade dos alunos antes da abordagem do próximo tópico do curso, fizemos o seguinte questionamento: “Se partículas quânticas, tais como elétrons e fótons, possuem tanto propriedades corpusculares quanto ondulatórias, o que você pensa a respeito das partículas macroscópicas?” “Elas não poderiam também apresentar esse comportamento *dual*, ou seja, apresentar ora um comportamento tipicamente corpuscular, ora um comportamento tipicamente ondulatório?” Nossa resposta a esse questionamento veio acompanhada da relação de De Broglie, justificando que todos os corpos ou partículas materiais (elétrons, fótons, átomos, balas de metralhadora, pessoas, animais, planetas etc.) apresentam também propriedades ondulatórias, além das propriedades corpusculares que estamos acostumados a atribuir-lhes.

Nesse momento, um questionamento surgiu dos próprios alunos: “Se todos os corpos apresentam, além de propriedades corpusculares, também propriedades ondulatórias, por que não observamos isso ocorrendo no nosso cotidiano?” Nossa resposta veio acompanhada das conclusões que eles mesmos já haviam obtido durante a realização da atividade virtual com objetos macroscópicos. Os efeitos ondulatórios não são observados em objetos macroscópicos porque os comprimentos de onda associados a tais corpos são muito pequenos se comparados com as dimensões das fendas e objetos cotidianos, de forma que a interferência e a difração existem, mas com as franjas claras do padrão de interferência em total superposição, de modo

que não são notadas. Já com objetos microscópicos, dotados de quantidades de movimento muito menores e que correspondem a comprimentos de onda muito maiores, os efeitos da difração e da interferência podem ser facilmente observados. Da mesma forma, na ótica geométrica não precisamos conhecer a natureza ondulatória da propagação da luz porque as dimensões dos equipamentos utilizados (como lentes, espelhos, fendas etc.) são bastante grandes quando comparadas com o comprimento de onda da luz utilizada.

Concluimos a quinta aula distribuindo uma lista de exercícios (Apêndice E) na qual foram revisados todos os conceitos trabalhados até o momento.

4.3.6. Sexta aula

4.3.6.1. Correção da lista de exercícios

No início da aula fizemos a correção de toda a lista de exercícios, quando os alunos tiveram a oportunidade de revisar tópicos abordados e sanar suas dúvidas. Durante essa revisão, os esquemas de assimilação dos alunos não foram ignorados, porém toda vez que um conceito provocava um grande desequilíbrio, por meio de argumentações fundamentadas, tentávamos reduzir o desequilíbrio. É nesse sentido que Piaget defende um ensino reversível como forma de amenizar os desequilíbrios, evitando, assim, o fracasso da aprendizagem.

4.3.6.2. A Função de onda e a natureza probabilística da teoria quântica

Iniciamos o último tópico do curso com o seguinte questionamento para a turma: “Acabamos de confirmar em nossas atividades virtuais o caráter ondulatório das partículas, o que ilustra a hipótese de De Broglie, mas que grandeza física explica a natureza ondulatória observada em partículas materiais?” “Como podemos associar uma função de onda ao movimento de uma partícula microscópica?” “Como são descritos os movimentos no mundo microscópico?”

As questões propostas causaram um desconforto na turma porque eles não sabiam ao certo o que responder. Então, tranquilizamos os alunos, revelando que as respostas a tais questões resultaram do trabalho conjunto de muitos dos maiores físicos do século XX e que, depois de vários insucessos, verificou-se que nenhuma grandeza física até então conhecida servia para descrever o comportamento ondulatório dessas partículas. Para tentar resolver a

questão, foi proposta a existência de uma *função de onda*, a função Ψ (psi), juntamente com uma interpretação física para a mesma. O que determina a evolução temporal da função de onda Ψ associada a objetos microscópicos é a equação de Schrödinger. A função Ψ é uma solução da equação de onda de Schrödinger e contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve.

Foram destacadas as características mais importantes da função de onda. Por exemplo, procuramos esclarecer que a equação de Schrödinger contém todas as informações que definem completamente o estado do sistema quântico. Contudo, sabemos que o número dessas informações é limitado e que essas limitações são *inerentes* à natureza, ou seja, não se trata de limitações tecnológicas ou de falta de precisão dos instrumentos usados.

Outra característica referente à função de onda Ψ é que é uma função *complexa*, ou seja, uma função que possui uma parte real e outra imaginária. Isso significa que a Ψ mesma não possui significado físico direto e, portanto, não pode representar uma grandeza fisicamente mensurável por possuir uma parte imaginária. Nesse momento, pedimos aos alunos que relembassem os aspectos básicos da álgebra usada para obter o quadrado do módulo de uma função complexa. Não demorou muito para que um aluno dissesse que precisávamos multiplicar a função pelo seu conjugado. Então, passamos a fazer, no quadro, o seguinte desenvolvimento matemático:

Partimos da premissa de que qualquer função complexa pode ser escrita pela equação $\psi(x,t) = R(x,t) + iL(x,t)$, onde $R(x,t)$ é a parte real e $iL(x,t)$, sua parte imaginária. Multiplicando a função acima pelo seu conjugado, obtemos:

$$\left[\begin{array}{l} \psi^* \psi = (R - iL)(R + iL) \\ \psi^* \psi = R^2 + L^2 \end{array} \right] \rightarrow |\psi|^2 \text{ é um número real não-negativo (positivo ou} \\ \text{nulo)}$$

Depois de feito todo o desenvolvimento no quadro e obtido o resultado de $|\Psi|^2$, chegamos, juntamente com os alunos, à conclusão de que essa função, sim, é uma função real, não complexa, devendo possuir, portanto, algum significado físico direto. Seu significado físico foi o aspecto considerado como o mais importante da aula. Portanto, esse assunto foi explorado inúmeras vezes durante a aula. Destacamos a importância da função de onda por

seu módulo ao quadrado fornecer a probabilidade por unidade de volume de se encontrar a partícula na vizinhança de um ponto do espaço e num determinado instante de tempo. O significado físico, portanto, é o de uma *densidade de probabilidade*. Essa é a famosa interpretação dada para módulo ao quadrado da função de onda proposta por Max Born em 1927. Procuramos esclarecer o real significado da interpretação de Bohr comentando sobre a relação entre a função de onda com a probabilidade de localização dos objetos macroscópicos.

Ao falar de probabilidades, julgamos necessário rever com a turma as diferenças mais relevantes de uma descrição probabilística e uma descrição determinística. Consideramos muito importante que os alunos tivessem seus esquemas de assimilação referentes a tais descrições bem organizados, a fim de que conseguissem ter uma equilibrarão majorante a respeito da natureza probabilística da teoria quântica. Para isso nos valem de dois exemplos, seguindo uma comparação proposta por Freire Júnior e Carvalho Neto (1997) para identificar as idéias implícitas na descrição determinística e na descrição probabilística. No primeiro exemplo, que se refere à descrição determinística, consideramos a situação do movimento de um objeto leve, tal como uma pena, por exemplo, caindo sob a ação da gravidade e do vento. Nessa situação “[...] a posição e a velocidade da pena estão definidas a cada instante, mesmo que os valores correspondentes a essas grandezas não sejam conhecidos. Há, então, uma trajetória bem definida para a pena.” (FREIRE JÚNIOR; CARVALHO NETO, 1997, p. 44). Embora não possamos saber exatamente onde a pena irá cair (o valor da força resultante pode ser comprometido pelo fato haver muito vento), podemos estimar o local mais provável onde a pena poderá cair. Neste caso, a descrição do movimento, portanto, não pode fornecer a posição e a velocidade – instantâneas – da pena por falta de informações. No entanto, a descrição desse movimento é determinística, pois, se conhecêssemos com precisão as condições iniciais do movimento, poderíamos obter, com bons recursos computacionais, a posição e a velocidade da pena em cada instante. Nesse caso não precisamos usar nem falar em probabilidade.

No segundo exemplo, que se refere à descrição probabilística, consideramos a situação do movimento do elétron num átomo de hidrogênio. Nessa situação, “[...] a posição e a velocidade são conceitos que não podem ser usados, simultaneamente, de forma bem definida, para o elétron. Não há então uma trajetória bem definida para ele. No entanto, é possível descrever o máximo do elétron em termos de probabilidade de localização”. (FREIRE JÚNIOR; CARVALHO NETO, 1997, p. 45). O uso de probabilidades, neste caso,

não decorre da insuficiência de informações, mas se trata de uma característica intrínseca do mundo microscópico. Eis a diferença fundamental nas duas situações exemplificadas: para objetos macroscópicos, o uso de probabilidades decorre de falta de informações; para objetos microscópicos, o uso de probabilidades *não* decorre da insuficiência de informações, mas é uma característica do mundo microscópico.

Para finalizar esse tópico, pedimos aos alunos que relembassem as conclusões inferidas das atividades virtuais em que utilizávamos partículas microscópicas. O objetivo da atividade foi relacionar tais conclusões com a interpretação da função de onda. Dessa forma, começamos a propor alguns questionamentos aos alunos, como, por exemplo: “Como poderíamos verificar a existência da função de onda a partir dos padrões visualizados na tela do *software* nas atividades com partículas microscópicas?” “Como poderíamos interpretar o caráter estatístico ou probabilístico nesses padrões?” “Quando o experimento de Young é refeito, o que acontece com as partículas microscópicas ao chegarem à fenda dupla: elas se dividem ou não?” “O que faz com que uma partícula microscópica possa interferir consigo mesma?”

Para responder a tais questões, voltamos ao experimento de Young da fenda dupla, simulando-o no *software* e projetando-o com o canhão multimídia. Ao observarmos o padrão formado, concluímos que a frente de onda luminosa dividira-se ao passar pelas duas fendas. Cada nova frente de onda assim produzida propaga-se, a partir de cada fenda, até a tela; ao chegar à tela, as frentes de onda superpõem-se, interferindo entre si. Da mesma forma que uma onda luminosa divide-se em duas quando encontra uma dupla fenda, as funções de onda associadas às partículas microscópicas que incidem na dupla fenda (mesmo sendo uma de cada vez) dividem-se (e não as partículas), propagam-se, após, até a tela, onde irão se superpor, daí resultando a interferência de uma “partícula” consigo. O módulo ao quadrado da função de onda resultante na tela representa a densidade de probabilidade de encontrar uma partícula microscópica do feixe atingindo a tela neste ponto ou numa vizinhança infinitesimal do mesmo, num determinado instante. A partir dessa argumentação, passamos a questionar os alunos: “Quais os lugares mais prováveis da tela para uma partícula microscópica do feixe atingi-la?” A resposta não demorou, pois os alunos ainda estavam visualizando o padrão mostrado na tela do *software*: são aqueles onde é maior o valor do módulo ao quadrado de sua função de onda (franjas claras). Quanto aos lugares menos prováveis de se encontrar uma

partícula microscópica atingindo a tela são aqueles onde são menores os valores do módulo ao quadrado da função de onda (franjas escuras).

Essa atividade fez parte de uma estratégia para nortear os alunos na adaptação de novos esquemas de assimilação, a fim de que compreendessem as conseqüências da interpretação proposta por Born, no sentido de que a natureza pode ser descrita em termos de probabilidade e de que a física quântica possui um caráter essencialmente probabilístico.

4.3.6.3. Pós-teste

Neste último período de aplicação da proposta, propusemos aos alunos a realização de um instrumento de avaliação, que foi um pós-teste exatamente igual ao que fora aplicado como pré-teste. Os alunos, entretanto, só tiveram conhecimento de que os testes eram os mesmos após receberem o pós-teste. Como pode ser verificado no Apêndice A, o teste de conhecimento, obviamente, priorizou os conteúdos trabalhados no curso. A razão de o pré-teste e pós-teste serem iguais é possibilitar fazer uma comparação entre os dois. No próximo capítulo, faremos uma descrição mais pormenorizada dos resultados do pós-teste e, também, dos demais instrumentos de avaliação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste capítulo é o de descrever os resultados da aplicação do material instrucional em sala de aula. Apresentaremos alguns dos resultados dos testes de conhecimento (pré-teste e pós-teste) e os resultados das atividades experimentais, estes relatados através de discussão, comentários e interpretados à luz do referencial teórico e do contexto no qual foi desenvolvido o trabalho. Faremos uma avaliação estatística simples com o objetivo de determinar se houve diferença significativa entre as médias do pós-teste e pré-teste e, uma avaliação qualitativa informal, na qual incluiremos os indicadores positivos e os indicadores negativos, sem o intuito de provar nada, apenas relatando o que realmente aconteceu.

5.1. DESEMPENHOS NOS PRÉ-TESTE E PÓS-TESTE

As questões do teste de conhecimento (o pré-teste e o pós-teste, que são exatamente idênticos e se encontram no Apêndice A) constituem um total de seis questões alternativas e nove questões discursivas. Algumas questões foram elaboradas por nós mesmos e outras, adaptadas a partir de questões retiradas de concursos de vestibulares. Todas as questões do teste de conhecimento foram validadas por cinco professores de física, alguns dos quais colegas do Mestrado Profissional em Ensino de Física, nesta instituição. Inicialmente, faremos comparações entre os resultados das questões do pré-teste e do pós-teste, aquele respondido por 16 alunos, e este, por 21 alunos. Para isso, apresentamos o enunciado das seis primeiras questões alternativas juntamente com um gráfico – mostrando o desempenho dos estudantes nas respostas. O objetivo da apresentação dos gráficos é apenas para que o leitor possa ter facilitada uma visão comparativa entre as respostas dadas anteriormente e posteriormente ao curso.

Questão 1 - A respeito da natureza da luz, podemos afirmar que

(a) a luz pode ser compreendida como sendo um feixe de minúsculos grãos de uma matéria diferente da comum;

(b) a luz pode ser compreendida como sendo uma onda mecânica e, para ser transmitida, necessita de um meio material para se propagar;

(c) a luz pode ser compreendida como sendo uma onda eletromagnética e, para ser transmitida, necessita de um meio material para se propagar;

(d) a luz pode ser compreendida como sendo formada por partículas sem massa, as quais, de alguma forma, são influenciadas por ondas;

(e) a luz ora se comporta como se fosse formada por partículas, ora como uma onda, dependendo do experimento que se faz com ela.

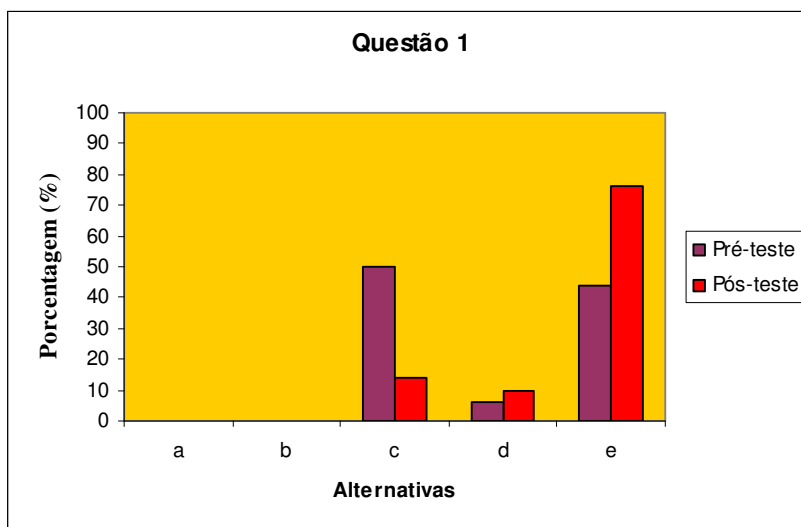


Figura 12: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 2

Esta questão foi proposta com o objetivo de verificar o conhecimento que os alunos apresentam em relação à natureza da luz. A Figura 12 mostra que, no pré-teste, a maior parte dos alunos assinalou a alternativa “c” (a luz pode ser compreendida como sendo uma onda eletromagnética e, para ser transmitida, necessita de um meio material para se propagar). Essa resposta demonstra que, para esse percentual de alunos, o comportamento dual da luz não estava bem compreendido. No pós-teste, a opção “e” (a luz ora se comporta como se fosse formada por partículas, ora se comporta como uma onda, dependendo do experimento que se faz com ela) foi assinalada com maior frequência. Por meio de suas respostas no pós-teste, percebemos que a maioria dos alunos demonstrou que passara a compreender melhor o caráter dualístico da luz.

Questão 2 - A polarização da luz consiste em

- (a) transformar uma onda luminosa em uma onda longitudinal;
- (b) transformar uma onda luminosa não-monocromática em luz monocromática;
- (c) fazer o campo elétrico da onda luminosa oscilar em um mesmo plano enquanto ela se propaga;
- (d) fazer o campo elétrico da luz oscilar em vários planos enquanto ela se propaga;
- (e) a luz não pode ser polarizada.

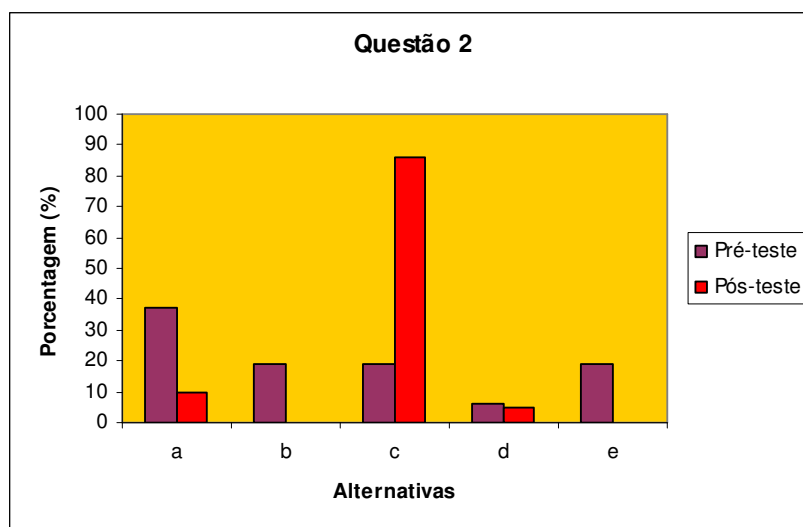


Figura 13: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 2

Como podemos verificar na Figura 13, no pré-teste, a alternativa “a” (transformar uma onda luminosa em uma onda longitudinal) foi assinalada com maior frequência, porém houve respostas com iguais porcentagens para as alternativas “b”, “c”, e “d”. No pós-teste, confirmamos a expectativa de que a maioria dos alunos optaria pela alternativa “c” (fazer o campo elétrico da onda luminosa oscilar em um mesmo plano enquanto ela se propaga), embora uma porcentagem muito pequena de alunos ainda tenham assinalado a alternativa “a” e “d”.

Questão 3 - O caráter corpuscular da luz explica

- (a) o fenômeno da difração.
- (b) o efeito fotoelétrico.
- (c) o fenômeno da polarização.
- (d) o fenômeno da interferência.
- (e) o que se observa no experimento da fenda dupla de Young.

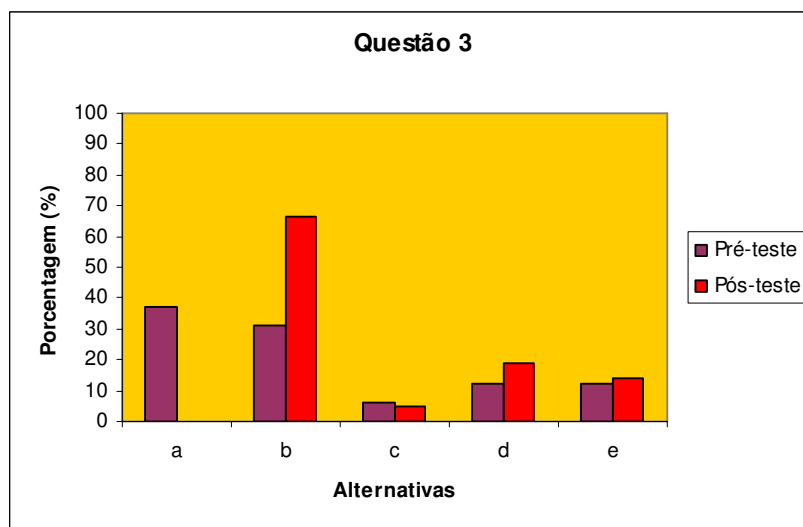


Figura 14: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 3.

O objetivo da questão 3 era o de identificar, por meio das respostas fornecidas pelos alunos, quais são os seus esquemas de assimilação referentes ao caráter corpuscular da luz. Como podemos observar na Figura 14, os alunos não tinham clareza a respeito desse aspecto, uma vez que um grande percentual deles optou pela alternativa “a” (o fenômeno da difração). Também houve uma parcela significativa de estudantes que escolheu as alternativas “d” e “e”. Um fato que nos chamou a atenção nessa questão é que, no pós-teste, embora a maioria tenha assinalado a questão “b” (o efeito fotoelétrico), houve um aumento de percentual para as alternativas “d” e “e”. Entendemos que isso se justifica pelo fato de que o efeito fotoelétrico foi abordado muito superficialmente no curso, de modo que, embora os alunos demonstrassem que compreendiam a questão do caráter corpuscular da luz, não conseguiram associá-la ao efeito fotoelétrico. Esse foi um dos indicadores negativos do nosso curso. Em contrapartida, podemos observar que a alternativa “a”, que havia sido assinalada com maior frequência no pré-teste, teve um percentual zero de respostas no pós-teste. Isso demonstra, com clareza, que os alunos compreenderam bem o significado da difração associado ao caráter ondulatório. O que pode ser considerado como um dos indicadores positivos do curso.

Questão 4 - A interferência da luz representa uma constatação de que a luz

- (a) Possui um caráter corpuscular;
- (b) É um ente que se propaga com grande velocidade;
- (c) Possui um caráter ondulatório;
- (d) É um fenômeno quântico;
- (e) É um fenômeno elétrico.

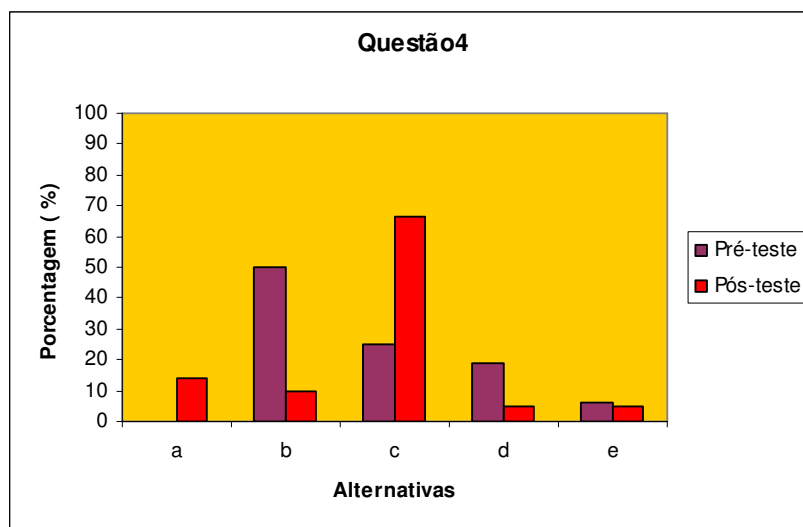


Figura 15: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 4.

A Figura 15 mostra que a maioria dos alunos optou pela alternativa “b” (é um ente que se propaga com grande velocidade) no pré-teste. Já, no pós-teste, a maioria optou pela alternativa “c” (possui um caráter ondulatório) e houve uma expressiva queda em relação à alternativa assinalada no pré-teste. Isso demonstra que a maioria dos alunos conseguiu assimilar o significado da questão do caráter ondulatório.

Questão 5 - Dentre as afirmações abaixo, qual é a correta?

- (a) A energia de um átomo não pode assumir qualquer valor.
- (b) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
- (c) As órbitas ocupadas pelos elétrons atômicos são as mesmas em todos os átomos.
- (d) O núcleo de um átomo é composto por prótons, nêutrons e elétrons.
- (e) Em todos os átomos, o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons.

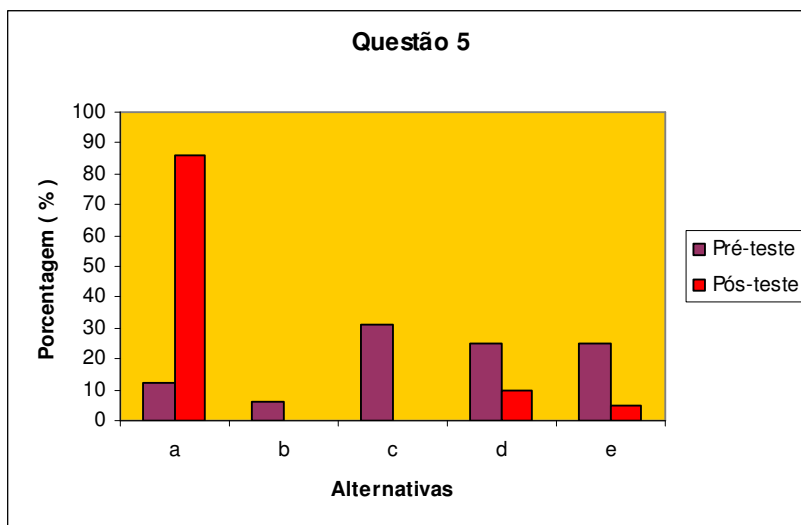


Figura 16: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 5.

Essa questão envolve uma das principais características quânticas trabalhadas em nosso curso. Como podemos ver na Figura 16, no pré-teste os alunos tinham muitas dúvidas a respeito dessa característica, pois todas as alternativas foram assinaladas. O pós-teste nos mostra que as respostas dos alunos para a questão concentraram-se na alternativa “a” (a energia de um átomo não pode assumir qualquer valor). Durante a realização do curso, por várias vezes tivemos a oportunidade de instigar os alunos a explicarem a situação descrita na questão. O resultado do pós-teste confirmou que a maioria deles, de fato, conseguiu compreender o significado da quantização de energia relacionada ao mundo microscópico.

Questão 6 - (CV-UFRGS -1990) Considerando as naturezas ondulatórias e corpusculares da luz, verifica-se que a energia dos fótons associados à luz no vácuo é inversamente proporcional e que a quantidade de movimento linear dos fótons é diretamente proporcional dessa luz. Qual a alternativa que preenche de forma correta às duas lacunas, respectivamente?

- (a) à velocidade - ao comprimento de onda
- (b) à frequência - à velocidade
- (c) à frequência - à frequência
- (d) ao comprimento de onda - à frequência
- (e) ao comprimento de onda - ao comprimento de onda

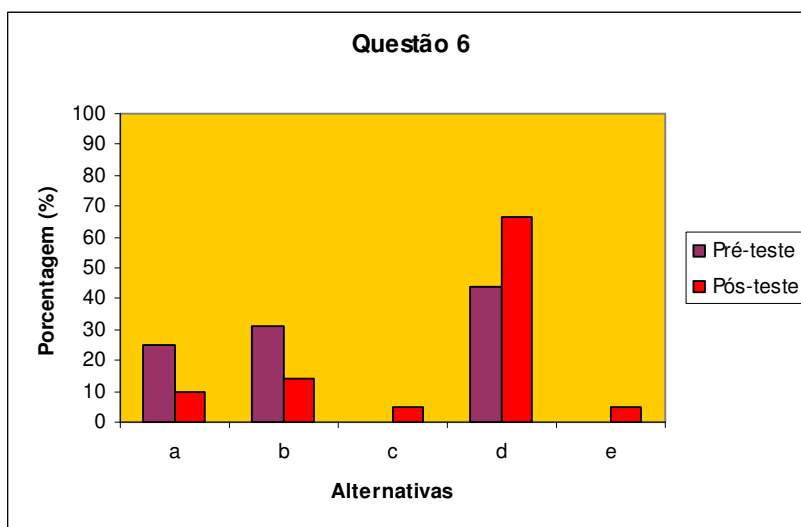


Figura 17: Distribuição das respostas dos alunos referentes à questão 6.

A questão 6 aborda novamente o tópico da dualidade onda-partícula, relacionando-a com a energia. Trata-se de dois aspectos importantes que foram muito trabalhados no curso. A Figura 17 mostra que, após a realização do curso, os alunos tiveram uma melhor compreensão do comportamento dialético da luz e boa parte deles demonstrou ter uma boa compreensão do significado da relação de Planck.

A partir de agora faremos um pequeno comentário a respeito das questões dissertativas. As questões são diversificadas, de forma a situar o aluno naquilo que posteriormente seria abordado em sala de aula. O objetivo das questões dissertativas era analisar, no pós-teste, a capacidade de interpretação dos alunos em relação ao que fora estudado. Optamos novamente por transcrever as questões neste capítulo para que o leitor

tenha maior facilidade de leitura, embora todas as questões possam ser encontradas também no Apêndice A.

Questão 7: Na famosa experiência da fenda dupla de Young, a fonte utilizada emitia luz (aproximadamente) monocromática. Por quê? Qual a conclusão a que Young chegou depois de realizar esse experimento?

Como referimos anteriormente, o número total de alunos presentes no dia do pré-teste era de 16 e, no pós-teste, de 21. Tivemos a preocupação de solicitar que os alunos não deixassem respostas em branco, escrevendo sempre algum comentário a respeito, caso não soubessem responder. O resultado nos chamou muito a atenção porque 15 alunos se expressaram com respostas do tipo: “não sei, nunca vi, nem sei quem é, já ouvi falar de Young mas não sei o que significa...”; apenas um escreveu: “a conclusão a que Young chegou depois de realizar esse experimento é de que a luz não se propaga linearmente”. Já no pós-teste, 11 alunos responderam corretamente à questão, nove responderam-na parcialmente, omitindo algum dado, e apenas dois deixaram-na sem resposta.

Questão 8: O que significa o termo quântico aplicado à luz? E quando ele é aplicado ao átomo?

Não obtivemos nenhuma resposta correta referente a essa questão no pré-teste. Um total de 11 alunos sequer tentou formular respostas, apenas escreveram coisas do tipo “nunca vi, vai saber, sei lá”. Apenas cinco alunos tentaram formular alguma resposta, mas, mesmo assim, totalmente erradas. No pós-teste, apenas um aluno deixou a questão sem resposta; o restante elaborou respostas que, embora não estivessem totalmente corretas, conseguiam explicar parcialmente o termo quântico aplicado à luz. Somente seis alunos relacionaram o termo quântico também com o átomo.

Questão 9: A luz se propaga de um lugar para outro como uma onda ou como uma partícula?

No pré-teste, cinco alunos responderam que a luz se propaga de um lugar para outro como uma partícula e 11 alunos, que a luz se propaga de um lugar para outro como uma onda. No pós-teste 15 alunos responderam que a luz se propaga de um lugar para outro como uma onda e, seis, que a luz se comporta ora como partícula, ora como onda. Estes alunos não interpretaram bem a questão nenhum respondeu que a luz se propaga de um lugar para outro como uma partícula.

Questão 10: A luz interage com um detector qualquer (tela, sensor luminoso, célula fotoelétrica, célula da retina etc.) como uma onda ou como partícula?

No pré-teste, sete alunos responderam que a luz interage com um detector como uma partícula; sete que a luz interage com um detector como uma onda e dois não responderam à questão. No pós-teste, 19 alunos responderam que a luz interage com um detector como uma partícula e apenas dois, que a luz interage com um detector como uma onda.

Questão 11: Em sua opinião, quais são as diferenças mais relevantes entre física clássica e física quântica.

No pré-teste, dois alunos responderam à questão usando como referência para física clássica as leis de Newton e, para a física quântica partículas microscópicas; quatro alunos não souberam responder e 10 responderam justificando que a diferença mais relevante é que “a física clássica é velha e ultrapassada e a física quântica é atual”. Todos os alunos que responderam ao pós-teste relacionaram a física clássica com objetos macroscópicos e com as leis de Newton e, a física quântica com objetos microscópicos. Alguns alunos escreveram sobre o caráter probabilístico da física quântica e sobre o fato de ela também descrever objetos macroscópicos, destacando o fato de que a física clássica, ao contrário da quântica, só trabalha com objetos macroscópicos.

Questão 12: As leis da mecânica clássica são válidas para todos os corpos, sejam eles microscópicos ou macroscópicos? Explique sua resposta, citando exemplos.

Nenhum aluno respondeu à questão de forma completa no pré-teste; apenas seis disseram que as leis da mecânica clássica são válidas somente para os corpos macroscópicos, mas nenhum deles conseguiu justificar com exemplos esse fato. No pós-teste, as respostas se distribuíram da seguinte maneira: dois alunos responderam que sim, que as leis da mecânica clássica são válidas tanto para objetos macroscópicos quanto para objetos microscópicos; um aluno deixou a questão sem responder; os 18 alunos restantes responderam corretamente à questão e citaram alguns exemplos para objetos macroscópicos (fios de cabelos, planetas, balas de metralhadora) e também para objetos microscópicos (elétrons e fótons).

Questão 13: A analogia entre os elétrons de um átomo e os planetas do sistema solar é imperfeita. Cite pelo menos uma razão para justificar essa afirmação.

No pré-teste, um total de 10 alunos deixou sem resposta a questão; o restante deles ainda tentou formular uma resposta, mas não obtiveram êxito, pois suas respostas não tinham qualquer significado físico. No pós-teste também não obtivemos muito sucesso, pois apenas sete alunos responderam à questão de forma satisfatória. Uma parte desse grupo justificou suas respostas com base na teoria eletromagnética, dizendo que, se os elétrons estão em movimento acelerado, devem emitir radiação eletromagnética e, portanto, devem perder gradualmente energia em forma de ondas eletromagnéticas emitidas. Isso significa que, no modelo planetário, o elétron em órbita acabaria por perder toda a sua energia e colapsaria para o núcleo. O restante do grupo apenas justificou que a analogia é falsa, pois os elétrons fazem parte do mundo microscópico e, portanto, não podem ser regidos pelas mesmas leis que os planetas, que são objetos macroscópicos.

Questão 14: O que é um fóton? Qual sua massa? Qual a sua velocidade de propagação no vácuo?

No pré-teste, dois alunos definiram o fóton corretamente e souberam dizer o valor de sua velocidade de propagação no vácuo. Nenhum aluno soube dizer a massa do fóton. No pós-teste, todos os alunos definiram corretamente o fóton; apenas dois erraram na resposta sobre a velocidade dos fótons, afirmando que tanto a massa quanto a velocidade eram nulas. O restante dos alunos respondeu corretamente sobre os valores de massa e velocidade do fóton.

Questão 15: Você já ouviu falar no *spin* de um elétron? Em caso afirmativo, tente explicar com suas próprias palavras do que se trata.

No pré-teste, ninguém explicou do que se trata o *spin*, embora alguns dos alunos dissessem que já tinham ouvido falar em *spin*. No pós-teste, apenas dois alunos não responderam à questão; os 19 alunos restantes responderam-na segundo uma visão clássica, dizendo que *spin* é o momento angular intrínseco do elétron, isto é, o giro ao redor de si mesmo. Não obtivemos respostas com uma visão quântica, como uma característica dos elétrons advinda do princípio de exclusão.

Antes de passarmos para as atividades virtuais, faremos um breve comentário sobre o resultado encontrado na comparação feita entre pré-teste e pós-teste. Para fazer essa comparação utilizamos os escores do pré-teste (X) ¹³ e do pós-teste (Y) para calcular a variável ganho (G) pela diferença entre Y e X. O objetivo desse procedimento é verificar se a média da variável ganho difere significativamente de zero e, portanto, se existe uma diferença significativa entre as médias do pós - teste e do pré-teste.

Utilizando-se da tabela de valores críticos da razão *t student*,¹⁴ constatamos que o nível de significância estatística associado ao valor encontrado para *t* ($t = 12,07$) é inferior a 0,01 (pois nesse nível a tabela apresenta para o número de graus de liberdade $g.l. = 15$, $t = 2,70$). Então, concluímos que a probabilidade de que a diferença média entre o pós-teste e o pré-teste

¹³ Os escores e o procedimento da análise estatística encontram-se na tabela 1 do Apêndice F.

¹⁴ Esse procedimento é sugerido pelo professor Fernando Lang da UFRGS e o endereço encontra-se nas notas bibliográficas.

tenha ocorrido por acaso é menor que 1 %, portanto, muito pequena. Acreditamos que houve um crescimento desse grupo de alunos nos seus escores no pré-teste e pós-testes.

A seguir relataremos algumas percepções que tivemos do resultado da aplicação do teste de conhecimento. No dia em que os alunos realizaram o pré-teste, pelos comentários dos próprios alunos e, também, pelos resultados relatados acima, observamos uma grande ansiedade por parte deles. Ao receberem o teste, a maioria dizia não saber praticamente nada sobre o assunto. Acreditamos que essa reação por parte dos alunos acabou motivando-os. Após o impacto provocado pelo pré-teste na fase inicial do curso, eles demonstravam uma grande predisposição para aprender os novos conceitos abordados, os quais nunca haviam sido apresentados à maioria dos estudantes. Acreditamos que, por isso, as aulas tiveram grande participação dos alunos; inclusive muitas vezes até precisamos discutir tópicos que não estavam previstos no curso em razão dos vários questionamentos feitos. Em nosso entendimento, dado o contexto no qual foi realizado o curso – com futuros professores de Física –, essa preocupação foi um aspecto muito positivo. Na fase inicial do curso, os alunos tomaram consciência de que, por não saberem responder a quase nada do pré-teste, precisavam aprender mais. Esse aspecto, portanto, foi considerado muito construtivo por nós.

Os questionamentos, as dúvidas e os comentários ocorreram sistematicamente em todas as aulas, embora, em algumas delas, alguns alunos tenham tido de se ausentar mais cedo por dependerem de transporte, uma vez que quase todos não residem na cidade de Passo Fundo. Essa foi uma das maiores dificuldades enfrentadas durante o curso, um fator muito negativo para o bom andamento do curso. Outro fator considerado como negativo foi que todas as aulas ocorreram em noites de sexta-feira, fato que fugiu totalmente ao nosso controle, uma vez que foi esse o horário que o Departamento de Física da UPF disponibilizou para a realização do curso. Por consequência, tivemos algumas interrupções feitas pelo Diretório Central de Estudantes, pela comissão de formatura e por outros eventos (tais como uma festa de São João concomitante às aulas ...) realizados nesses dias.

Outro fator negativo que deve ser relatado aqui diz respeito à parte final do curso, que se encerrou na mesma semana em que se concluíu o semestre letivo na universidade. Este fator contribuiu para que os alunos ficassem muito apreensivos por terem de realizar várias provas na época. Diferentemente do pré-teste, que foi realizado sem que os alunos soubessem disso previamente, o pós-teste foi agendado com antecedência (para o último dia de aula).

Assim, com o objetivo de que os alunos pudessem revisar os conteúdos trabalhados no curso, o pós-teste foi considerado como uma prova que faria parte da avaliação do semestre letivo. Como dissemos, o objetivo era que os alunos estudassem seriamente para a avaliação final. Nessa etapa do curso, um fato não contribuiu positivamente para o nosso objetivo: os alunos foram avisados pela professora da disciplina de que essa avaliação do curso não resultaria em qualquer alteração na nota final da disciplina na qual o curso estava inserido. Relembramos que o nosso curso foi inserido dentro da disciplina de Didática, cuja professora regente da turma já tinha realizado alguns instrumentos de avaliação com os alunos. Como consequência, os alunos vieram para a avaliação sem estudar. Mesmo assim, com todas as dificuldades enfrentadas, consideramos que o resultado do teste de conhecimento foi bastante positivo, pois mostrou claramente que houve progresso em relação aos esquemas de assimilação que os alunos possuíam quando do início do curso.

Um fato que nos deixou bastante satisfeitos em relação a nossa proposta pedagógica foi que alguns alunos ficaram muito interessados em continuar aprendendo mais sobre a física quântica, inclusive uma das alunas chegou a procurar a coordenação do curso pedindo orientação para que sua monografia final do curso fosse sobre física quântica.

5.2. ATIVIDADES VIRTUAIS

Como referimos anteriormente, as atividades virtuais foram divididas em dois roteiros (Apêndices C e D). Nossos comentários e observações a respeito dessas atividades serão apenas qualitativos. Não transcreveremos as questões, como fizemos no item anterior, porque essas atividades foram também avaliadas durante a sua execução e na entrega dos relatórios.

A parte inicial da aula envolveu um maior tempo a fim de que, após a apresentação o *software* fosse manipulado aos poucos pelos alunos. Embora o roteiro trouxesse todos os passos necessários para a manipulação do *software*, percebemos que grande parte dos alunos não leu as considerações iniciais do roteiro, pois faziam perguntas que já estavam esclarecidas no papel. Tivemos bastante dificuldade para começar efetivamente a aula. Assim como as considerações iniciais, percebemos que as primeiras questões do roteiro foram respondidas por uma minoria com afirmativas totalmente diferentes daquelas esperadas. Por exemplo, a primeira parte do roteiro trabalhava exclusivamente com partículas macroscópicas (balas de

metralhadora e partículas de um *spray*), e duas duplas de alunos responderam às perguntas iniciais referindo-se às partículas usadas como se fossem fótons ou “fontes de luz”; no decorrer da atividade, estes alunos passaram a se referir a elas como balas de metralhadora. Confirmamos aí nossa suspeita de que alguns alunos não estavam lendo o roteiro com atenção. Respondemos muitas perguntas (muitas vezes repetidas) a respeito de detalhes que não haviam sido observados durante a leitura. Gradualmente, contudo, essas atitudes foram desaparecendo e os alunos conseguiram empreender um bom ritmo de trabalho, com a maioria dos alunos respondendo sistematicamente às questões do roteiro. Então, aos poucos foram construindo, através da manipulação do objeto virtual, os esquemas de assimilação referentes às características mais relevantes dos objetos macroscópicos. Embora uma parcela dos alunos demonstrasse compreender bem as atividades propostas, observamos que somente após a retomada do assunto, na aula seguinte (conforme descrevemos no capítulo 4), a maioria deles conseguiu se adaptar aos novos esquemas de assimilação.

Na segunda parte da atividade virtual, na qual trabalhamos com partículas microscópicas, obtivemos melhores resultados no que diz respeito à interação dos alunos com o *software*, ao intercâmbio com a professora, à elaboração de respostas e ao aproveitamento do tempo disponível de aula. Conseguimos constatar no decorrer da aula uma característica comum à maioria dos alunos: eles estavam conseguindo reconhecer padrões de difração e de interferência, fazer comparações entre os objetos macroscópicos e microscópicos e identificar o caráter dualístico da luz. Uma pequena parcela dos alunos já falava até mesmo em probabilidade de localização das partículas, antes mesmo de esse conceito ser abordado formalmente na aula. Nesta segunda etapa do roteiro, contrariamente à etapa anterior, percebemos a empolgação e o interesse dos alunos ao manipularem o *software*. Acreditamos que, nesta etapa, os alunos tenham conseguido captar que o *software*, além da capacidade de persuadi-los através das situações que simula, contribui muito para a assimilação dos novos conceitos.

Como registramos anteriormente, não temos aqui a pretensão de provar nada, mas, podemos dizer que, pelo nosso acompanhamento durante as aulas, pelas discussões levantadas, nas tarefas realizadas e, até mesmo, pelo acompanhamento individual a cada aluno (pois se tratava de uma turma pequena), foi possível constatar, após a realização das atividades virtuais, o surgimento de uma compreensão aprimorada dos conceitos físicos envolvidos. Essa argumentação pode ser perfeitamente justificada, uma vez que, por meio das

atividades virtuais, o aluno teve a oportunidade de confrontar os seus conhecimentos prévios, muitas vezes enraizados no senso comum ou em esquemas de assimilação já existentes, com os novos conhecimentos adquiridos. Com certeza, essa análise não pode ser considerada uma análise objetiva e científica de uma aprendizagem significativa, mas forneceu-nos subsídios para verificar se, de qualquer forma, houve um avanço quanto ao aprimoramento da compreensão dos conceitos quânticos abordados. Após as atividades virtuais, foi possível mostrar aos alunos os conceitos e as idéias que foram aperfeiçoados, como também mostrar eventuais falhas nas suas conclusões. Assim, foi possível uma recuperação dos conceitos não assimilados por parte de cada aluno, promovendo uma recuperação eficaz dos conceitos abordados durante a aplicação do curso.

6. CONCLUSÃO

O ensino, de um modo geral, enfrenta vários problemas, em especial, o ensino de física. Acreditamos que existem diferentes formas para resolvermos alguns dos problemas do ensino de física. Sabemos que essa disciplina possui diferentes aspectos que devem ser observados, quanto à forma como é ministrada, quanto às dificuldades que são inerentes ao seu ensino e quanto à falta de preparo de alguns professores. Dentro desse contexto, o aspecto que mais nos preocupa e que, a nosso ver, está intimamente ligado às dificuldades inerentes ao ensino é a motivação, que leva o aluno a ter uma predisposição para aprender. É nesse sentido que entendemos como função do professor/pesquisador de física buscar alternativas para diminuir os problemas e as dificuldades que afligem nossas salas de aula.

Nessa ótica, consideramos oportuna uma proposta de inserção da mecânica quântica no ensino médio, por se tratar de uma forma inovadora para ser acrescentada aos currículos e que poderá contribuir para motivar os alunos a resgatar o espírito questionador, e o desejo de conhecer o mundo que os cerca. Essa idéia foi confirmada pela revisão dos assuntos relacionados que foi feita no capítulo 2. A organização desta proposta de trabalho teve como objetivo fundamental trabalhar a viabilização dessa inserção com futuros professores de física através de um curso introdutório de mecânica quântica, por acreditar que eles poderão compartilhar conosco, num futuro bem próximo, a necessidade de rever com urgência os conteúdos ensinados no currículo das nossas escolas e a forma como são tradicionalmente abordados.

O desenvolvimento do curso possibilitou-nos a confirmação de algumas hipóteses levantadas de início. A esse respeito, destacamos a preocupação de que o texto de apoio, gerado como produto educacional, pudesse contribuir significativamente para a formação dos futuros professores de forma mais direcionada ao ensino médio. Podemos dizer que, durante a implementação do curso, este objetivo foi alcançado e justificamos nossa afirmação pelo fato de que, como pode ser verificado nos resultados mostrados no capítulo 5, o público-alvo não

tinha conhecimento dos assuntos abordados. Acreditamos que, além de contribuir para a formação desses alunos, os conteúdos foram abordados de forma elementar, direcionados aos alunos do ensino médio e adaptados à sua realidade, como alunos do interior do estado.

Outra hipótese confirmada na efetivação do curso foi a de que o uso das novas tecnologias de informação a serviço da educação, principalmente o uso do *software* Dopellspalt e de simulações computacionais disponíveis na internet, estimula sobremaneira os estudantes para o aprendizado. As atividades virtuais realizadas no laboratório de informática tiveram uma função fundamental no processo de ensino aprendizagem. A utilização do *software* Dopellspalt proporcionou aos alunos a possibilidade de vivenciarem experiências virtuais que seriam praticamente impossíveis de serem realizadas nos laboratórios disponíveis em nossas escolas. Essas atividades, além de contribuírem para a interação dos alunos com o *objeto virtual*, propiciaram a simulação de situações que permitiam aos alunos questionar, experimentar e descobrir relações. Acreditamos que o uso de simulações por computador constitui uma excelente estratégia para tornar o tema de estudo bem mais atraente para grande parte dos alunos. Conseqüentemente, ao despertarmos o interesse dos alunos, eles acabam compreendendo melhor o que lhes é apresentado, interessam-se e esforçam-se mais para compreender o assunto abordado, conseguindo direcionar com mais facilidade os seus esquemas mentais.

Outro aspecto importante que caracterizou a efetivação do nosso curso é o do trabalho em grupo. As atividades experimentais foram sempre realizadas em duplas, que, por sua vez, interagiam com outras duplas e também com a professora. Essa interação social desempenhou um papel muito significativo para o desenvolvimento conceitual dos alunos. O fato de eles conversarem, dividirem experiências e dúvidas e discutirem resultados, buscando vencer os obstáculos epistemológicos que inevitavelmente surgiram, atuou como um instrumento na aquisição do conhecimento. Não é demais salientar que as propostas deste trabalho somente serão compatíveis se respeitadas as condições mínimas de um ensino construtivista onde o professor, que detém os significados considerados corretos, deve orientar e mediar a solução de obstáculos ou de conflitos cognitivos, estimulando os alunos a compartilharem esses significados. Nesse processo o aluno é encorajado a construir seu próprio conhecimento, sem ficar na dependência de respostas prontas e acabadas por parte do professor.

Todos os resultados aqui apresentados nos convenceram de que é possível realizar a inserção da mecânica quântica no ensino médio e na formação de professores. Acreditamos que a proposta apresentada nesta dissertação, em especial o material instrucional desenvolvido e disponibilizado para os futuros professores, representa uma contribuição para a melhoria da qualidade do ensino de física. O material instrucional desenvolvido resultou:

- na elaboração de um texto de apoio contendo todos os conceitos trabalhados;
- na elaboração de dois roteiros para as atividades trabalhadas com o *software* Dopellspalt;
- na elaboração de uma lista de exercícios.

O material instrucional desta dissertação não contemplou alguns tópicos que poderiam ter sido abordados como pesquisa, como, por exemplo, o princípio da incerteza, o paradoxo do gato de Schrödinger e outros. Esses assuntos também são relevantes e passíveis de inclusão no ensino médio, citados aqui como sugestão para futuras pesquisas.

Fica aqui o desafio para que os professores/pesquisadores de física se tornem cada vez mais competentes, colocando significado no ato de ensinar, desenvolvendo um processo de aprender com o aluno, com suas intuições e com os conhecimentos que a vida se encarrega de patrocinar. O aluno precisa se sentir motivado para construir novos conhecimentos a partir dos esquemas mentais que já possui. Nesse contexto, a principal finalidade da educação científica é despertar no aluno a satisfação e o gosto pela aprendizagem do universo físico.

Para concluir, queremos salientar que o presente trabalho de dissertação nos ajudou a repensar de maneira reflexiva e crítica a nossa atuação como docente na disciplina de física e, por isso o termo “concluir” não tem, aqui, o sentido de finalizar, pois “este trabalho permitiu-nos entreabrir algumas portas e não fechá-las. Assim, não estamos no princípio nem no fim de um caminho, estamos no meio.” (SANTOS, 1991, p.244).

7. REFERÊNCIAS

ASSIS, O. Z. M. de. *Uma metodologia de educação pré-escolar*. São Paulo: Pioneira, 1979.

BACHELARD, G. *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. Original de 1938.

BASTOS FILHO, J. B. O Universo dos quantas: resenha. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 127-132, abr. 1999.

BENEDETTO, A; CAVALCANTE, M.A. Instrumentação em física moderna para o ensino médio: uma nova técnica para a análise quantitativa dos espectros. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 21, n.3, p.437-446, set. 1999.

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

_____. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio*. PCN+ Brasília, 2002. Disponível em: <http://cenp.edunet.sp.gov.br/Ens_medio/em_pcn.htm>. Acesso em: 28 ago. 2005.

_____. Secretaria de Educação Básica. *Orientações curriculares para o ensino médio: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília, MEC/SEMT, 2006.

BULCÃO, M. *O racionalismo da ciência contemporânea: uma análise da epistemologia de Gaston Bachelard*. Rio de Janeiro: Antares, 1981.

CARVALHO, A. M. P. de. Ensino de ciências e epistemologia genética. *Mente e Cérebro: Memória da Pedagogia*. São Paulo, v.1, n.1, p.51-57, out. 2005.

CAVALCANTE, M. A.; DI BENEDETTO, A. Instrumentação em física moderna para o ensino médio: uma nova técnica para a análise quantitativa de espectros. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v.21, n.3, p.437-446, set.1999.

CAVALCANTE, M. A; JARDIM V.; BARROS A. A. J. Inserção da física moderna no ensino médio: difração de um feixe de laser. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 154-169, ago.1999.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 298-316, dez. 2001.

CHAVES, T. V; HERNANDEZ, C. L; TERRAZZAN, E.A. Tópicos de física moderna numa perspectiva de atualização curricular permanente do ensino médio. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 2, 1999, Valinhos, *Atas...* Porto Alegre: [s.n.], 1999.1 CD-ROM.

DEMO, P. *Pesquisa e construção de Conhecimento*. 2. ed. Rio de Janeiro: Templo Brasileiro, 1994.

DOMINGUEZ, D. C. de. *A formação do conhecimento físico: um estudo da causalidade em Jean Piaget*. Niterói, EDUFF; Rio de Janeiro, UNIVERTA, 1992.

FREIRE JÚNIOR, O.; CARVALHO NETO. *O universo dos quanta: uma breve história da física moderna*. São Paulo: FTD, 1997.

FREIRE JÚNIOR., O. *et al.* Introducing quantum physics in secondary school. In: International History, Philosophy and Science Teaching Conference, 3, 1995, Minneapolis. Proceedings. Minneapolis: University of Minnesota, 1995. v. I. p. 412-419.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

MARTINS, A. F. P. *Concepções dos estudantes acerca do conceito de tempo: uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard*. 2004. 218 p. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MENESES, L.C. Uma física para o novo ensino médio. *Física na Escola*. São Paulo, v. 1, n.1, p.7, out. 2000.

MOREIRA, M. A; PAULO, I. J. C. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio *Revista da ABRAPEC*, São Paulo, v.4, n.2, mai/ago.2004. Disponível em: <http://www.fc.unesp.br/abrapec/revistas/v4n2a6.pdf>. Acesso em: 08 set. 2006.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. *Teorias construtivistas*. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1999. (Textos de apoio ao professor de física, n.10).

_____; Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa física moderna e contemporânea no ensino médio. *Investigação em Ensino das Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n.1, mar.2000. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/>. Acesso em: 5 jun.2004.

MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A.; Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da Formação Inicial de Professores. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 2, p. 135-151, ago.2001.

MORTIMER, E. F. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? *Investigação em Ensino das Ciências* v.1, n.1, abr. 1996. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/>. Acesso em: 10 maio 2006.

NITZKE, Julio A.; CAMPOS, M. B; LIMA, Maria F. P. *Estágios de desenvolvimento* PIAGET. 1997. Disponível em: <http://penta.ufrgs.br/~marcia/piaget/estagio.htm>. Acesso em: 10 maio 2006.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Ótica, relatividade e física quântica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. V.4.

PIAGET, J. *Para onde vai a educação?* 5. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1973.

_____. *Biologia e Conhecimento*. 2. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 1996.

_____. *Seis estudos de psicologia*. 24. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2004.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino Médio? *Caderno Catarinense do Ensino de Física*. Florianópolis, v.16, n. 1, p.7-22, abr. 1999.

SANTOS, M.E.V.M.dos. *Mudança conceptual na sala de aula: um desafio pedagógico*. Lisboa: Livros Horizonte, 1991.

SELNER, C. *Método para análise de sistemas de conhecimento, inspirado no princípio da complementaridade de Niels Bohr*. 131 p.2006. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVEIRA, F.L. *Determinando as significâncias estatísticas para as diferenças entre médias*. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~lang/Comparacoes_em_media.pdf. Acesso em: 10 dez. 2006.

SOUSA, C. M. S. G; MOREIRA, M.A. A causalidade piagetiana e os modelos mentais: explicações sobre o funcionamento do giroscópio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v.22, n.2, p.223-231, jun. 2000.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez.1992.

_____. *Perspectivas para a inserção de física moderna na escola média*. 1994. 246 p. Tese (Curso de Pós-Graduação em Educação) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 1994.

8. OBRAS CONSULTADAS

ALVES, R. *Filosofia da Ciência*. 16. ed. São Paulo: Brasiliense, 1992

ARRUDA, S.M.; VILLANI, Alberto. Mudança Conceitual no Ensino da Ciência. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.11 n.2, ago. 1994.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

GILMORE, R. *Alice no país do quantum*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Cambio Conceptual: Análisis Crítico y Propuestas a la Luz de la Teoría del Aprendizaje Significativo. *Ciência & Educação*, v.9, n.2, p.301-315, 2003.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. *Introdução à mecânica quântica*. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2003. (Textos de apoio ao professor de Física, n.13).

GRECA, I. M., MOREIRA, M. A., HERSCOVITZ, V. Uma proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 4, dez. 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, 1995. V. 4.

KRAGH, H. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education* p. 1.349-363, 1992.

PESSOA JÚNIOR; O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

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

SOUSA SANTOS, B. de. *Introdução a uma ciência pós-moderna*. Rio de Janeiro: Graal, 1989.

STRATHERN, P. *Bohr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

_____. *Einstein e a relatividade em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

9. APÊNDICES

9.1. APÊNDICE A – QUESTÕES

Questões de alternativas

1. A respeito da natureza da luz, podemos afirmar que
 - (a) a luz pode ser compreendida como sendo um feixe de minúsculos grãos de uma matéria diferente da comum.
 - (b) a luz pode ser compreendida como sendo uma onda mecânica e, para ser transmitida, necessita de um meio material para se propagar.
 - (c) a luz pode ser compreendida como sendo uma onda eletromagnética e, para ser transmitida, necessita de um meio material para se propagar.
 - (d) a luz pode ser compreendida como sendo formada por partículas sem massa, as quais, de alguma forma, são influenciadas por ondas.
 - (e) a luz ora se comporta como se fosse formada por partículas, ora como uma onda, dependendo do experimento que se faz com ela.

2. A polarização da luz consiste em
 - (a) transformar uma onda luminosa em uma onda longitudinal.
 - (b) transformar uma onda luminosa não-monocromática em luz monocromática.
 - (c) fazer o campo elétrico da onda luminosa oscilar em um mesmo plano enquanto ela se propaga.
 - (d) fazer o campo elétrico da luz oscilar em vários planos enquanto ela se propaga.
 - (e) a luz não pode ser polarizada.

3. O caráter corpuscular da luz explica
 - (a) o fenômeno da difração.
 - (b) o efeito fotoelétrico.
 - (c) o fenômeno da polarização.
 - (d) o fenômeno da interferência.
 - (e) o que se observa no experimento da fenda dupla de Young.

4. A interferência da luz representa uma constatação de que a luz
 - (a) possui um caráter corpuscular.
 - (b) é um ente que se propaga com grande velocidade.
 - (c) possui um caráter ondulatório.
 - (d) é um fenômeno quântico.
 - (e) é um fenômeno elétrico.

5. Dentre as afirmações abaixo, qual é a correta?
 - (a) A energia de um átomo não pode assumir qualquer valor.
 - (b) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
 - (c) As órbitas ocupadas pelos elétrons atômicos são as mesmas em todos os átomos.
 - (d) O núcleo de um átomo é composto por prótons, nêutrons e elétrons.
 - (e) Em todos os átomos, o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons.

6. (CV-UFRGS - 1990) Considerando as naturezas ondulatórias e corpusculares da luz, verifica-se que a energia dos fótons associados à luz no vácuo é inversamente proporcional e que a quantidade de movimento linear dos fótons é diretamente proporcional dessa luz.

Qual a alternativa que preenche de forma correta às duas lacunas, respectivamente?

- (a) à velocidade - ao comprimento de onda
- (b) à frequência - à velocidade
- (c) à frequência - à frequência
- (d) ao comprimento de onda - à frequência
- (e) ao comprimento de onda - ao comprimento de onda

Questões dissertativas

7. Na famosa experiência da fenda dupla de Young, a fonte utilizada emitia luz (aproximadamente) monocromática. Por quê? Qual a conclusão a que Young chegou depois de realizar esse experimento?

8. O que significa o termo quântico aplicado à luz? E quando ele é aplicado ao átomo?

9. A luz se propaga de um lugar para outro como uma onda ou como uma partícula?

10. A luz interage com um detector qualquer (tela, sensor luminoso, célula fotoelétrica, célula da retina etc) como uma onda ou como partícula?

11. Em sua opinião, quais são as diferenças mais relevantes entre física clássica e física quântica.

12. As leis da mecânica clássica são válidas para todos os corpos, sejam eles microscópicos ou macroscópicos? Explique sua resposta, citando exemplos.

13. A analogia entre os elétrons de um átomo e os planetas do sistema solar é imperfeita. Cite pelo menos uma razão para justificar essa afirmação.

14. O que é um fóton? Qual sua massa? Qual a sua velocidade de propagação no vácuo?

15. Você já ouviu falar no *spin* de um elétron? Em caso afirmativo, tente explicar com suas próprias palavras do que se trata.

9.2. APÊNDICE B – CURSO INTRODUTÓRIO DE MECÂNICA QUÂNTICA

1. O mundo microscópico e o mundo macroscópico

Sabemos que a matéria é formada por átomos – ou moléculas formadas por átomos – e estes, por sua vez, são formados por componentes ainda menores.

É muito difícil conseguir uma imagem de átomo ou molécula. Para um objeto ser visível (em bons microscópios), deve ser maior do que o comprimento de onda da luz utilizada para iluminá-lo. Uma vez que o espectro da luz visível pelos olhos humanos está, aproximadamente, na faixa que vai de 4.000 Å a 7.000 Å (1 Å, ou um angström, corresponde a 10^{-10} m), conforme pode ser visualizado no espectro magnético da Figura 1 (a escala usada para o espectro de luz visível da figura está em nanômetros, e $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$), os comprimentos de onda típicos da luz visível têm ordem de grandeza de alguns décimos de micrômetros ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$). Já o tamanho característico de um átomo é da ordem de alguns angströms, o que é centenas de vezes menor, portanto, que o comprimento de onda da luz visível. Por isso, um átomo não pode ser “visto” por meio de qualquer instrumento ótico.

Entretanto, podemos visualizar átomos não como fotografias obtidas com luz, mas como imagens obtidas por meio de microscópios eletrônicos de varredura, que produzem uma imagem aumentada do objeto (cerca de quinhentas vezes mais ampliada que a fornecida por um bom microscópio ótico). Tais instrumentos utilizam feixes de elétrons para obter essas imagens, o que é possível porque o comprimento de onda dos elétrons que formam o feixe utilizado é bem menor do que o comprimento de onda da luz visível e, portanto, da mesma ordem de grandeza do objeto de interesse. Também podemos capturar imagens de átomos com outro tipo de microscópio eletrônico, o microscópio de varredura por tunelamento (STM–*Scanning Tunneling Microscope*), no qual uma agulha microscópica vasculha a superfície, medindo, ao mesmo tempo, a corrente de tunelamento em cada ponto da varredura, resultando numa descrição minuciosa da superfície através da variação sofrida por essa corrente.

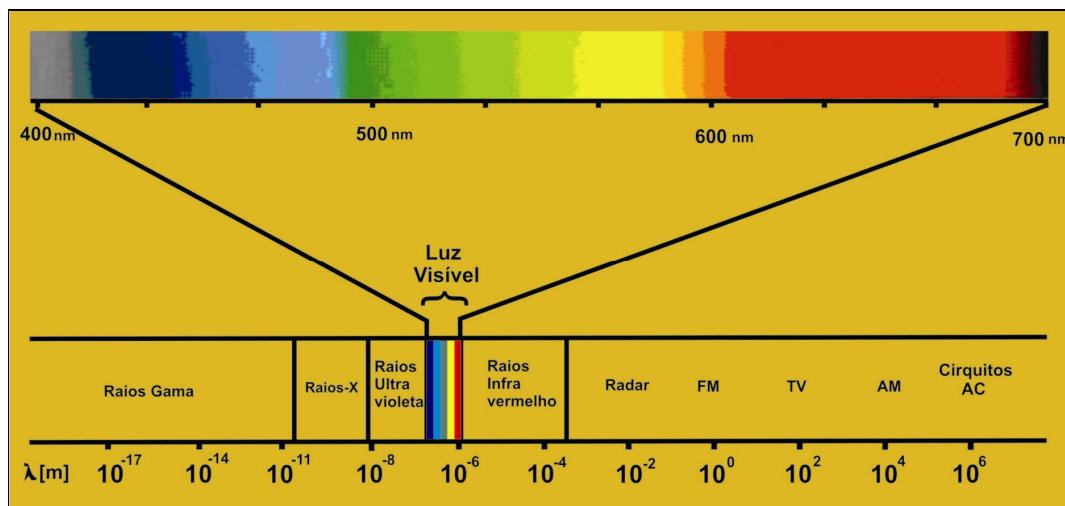


Figura 1 – O espectro eletromagnético

A Tabela 1 mostra algumas ordens de grandezas que podem ser comparadas com o tamanho típico de um átomo, ilustrando o que queremos dizer sempre que nos referirmos a um objeto como sendo “microscópico”.

Tabela 1 – Ordens de grandezas

Grandezas	Ordem de grandeza (em metros)
Raio do Universo	10^{25}
Distância da Terra ao Sol	10^{11}
Raio da Terra	10^6
Altura do homem	10^0
Espessura de um cabelo	10^{-4}
Bactérias	10^{-6}
Vírus	10^{-7}
Diâmetro atômico	10^{-10}
Raio nuclear	10^{-15}

Para nós, um objeto será considerado macroscópico quando for formado por um número muito grande (muito maior do que um trilhão, por exemplo) de átomos ou de moléculas. Podemos fazer algumas comparações entre o diâmetro de um átomo com os tamanhos dos objetos apresentados na Tabela 1. Iniciamos pelo diâmetro de um fio de cabelo, por ser, entre os objetos citados, o menor que ainda é visível a olho nu. Comparando-o com o diâmetro de um átomo, observamos que cerca de $1.000.000 = 10^6$ deles cabem no diâmetro de um fio de cabelo típico. Todavia, um pedacinho de fio de cabelo contém muito mais átomos do que isso, pois é um objeto tridimensional, com espessura e comprimento, além de largura. Por exemplo, se um fio de cabelo como este tivesse um comprimento igual à sua largura, teria um número de átomos com ordem de grandeza de 10^{18} , ou seja, um número impronunciável. Trata-se, por exemplo, de um número maior do que o número de segundos da idade do universo (cerca de 15 bilhões de anos)! Analogamente, numa dimensão linear (largura, por exemplo) de uma bactéria cabem cerca de 10.000 átomos, e, num vírus cerca de 1.000 átomos, numa dimensão linear de um vírus típico. Como esses são objetos tridimensionais, o número de átomos que cabem dentro de uma bactéria ou de um vírus é muitas ordens de grandeza maior do que 10.000 ou 1.000.

Um outro exemplo ainda mais expressivo da ordem de grandeza de uma simples célula orgânica em relação à ordem de grandeza dos nossos objetos microscópicos – os átomos – é o da molécula de DNA (ácido desoxirribonucleico) humano, ilustrado esquematicamente nas Figuras 2. Tal molécula fica localizada no núcleo de uma célula. Elas falam por si só!

Podemos ainda observar que a ordem de grandeza do tamanho de uma bactéria está na faixa da ordem do comprimento de onda da luz visível, de modo que, ao contrário de um átomo, pode ser “vista” ou fotografada por meio de algum instrumento óptico de aumento que utilize a luz comum, tal como um microscópio ótico.

Como realçado por Hewitt (2002), além de incrivelmente pequenos, os átomos são extremamente numerosos. Existem cerca de $1.000.000.000.000.000.000.000.000 = 10^{24}$ átomos em apenas 1 grama de água! Esse número, por exemplo, é maior do que o número de gotas de todos os lagos e rios do mundo inteiro. Além disso, os átomos são quase tão antigos quanto o próprio universo.

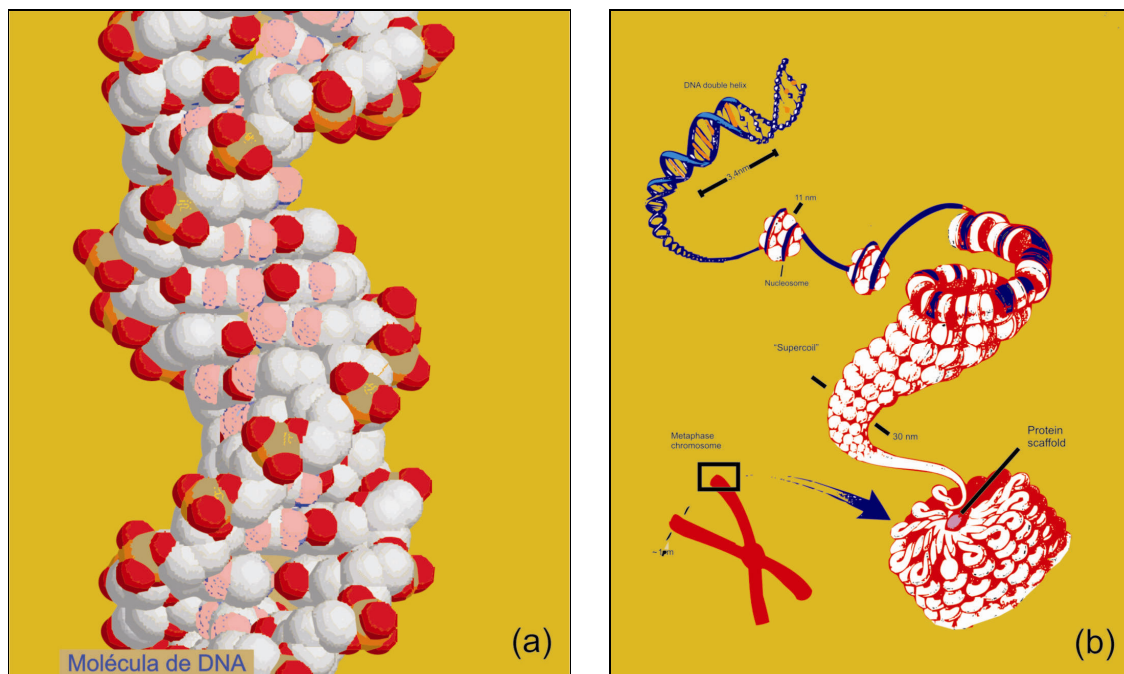


Figura 2 – Representação da molécula de DNA

2(a) Representação de um trecho de uma molécula de DNA humano: cada átomo de determinado elemento químico é representado simbolicamente por uma “bola” de uma mesma cor. Nessa representação, comum para os químicos, as esferas se interpenetram para simbolizar ligações químicas.

2(b) Como o DNA humano “se enrola” para formar cada um dos 23 pares de cromossomos contidos apenas no núcleo de uma célula humana

Em contraste, um objeto será considerado como microscópico quando for constituído por um número relativamente pequeno de átomos ou moléculas. Mais tarde, quando estivermos abordando a mecânica quântica de Schrödinger, trataremos de dar uma definição mais precisa do significado dos termos macroscópico e microscópico. Por ora, e neste contexto, os átomos serão nossos constituintes microscópicos básicos e paradigmáticos, que servirão de comparação, em tamanho e massa, para outros objetos, maiores ou menores.

Assim, temos basicamente duas escalas de tamanho com as quais podemos analisar o comportamento da matéria: a escala macroscópica e a escala microscópica. A escala macroscópica é a dos fenômenos que envolvem objetos (inclusive bactérias!) ditos macroscópicos.

Os fenômenos que ocorrem no mundo microscópico são analisados de maneira diferente daqueles que ocorrem no mundo macroscópico. O mundo macroscópico é descrito pela física clássica (formada pela mecânica newtoniana, termodinâmica e o eletromagnetismo de Maxwell), que trabalha com duas categorias de fenômenos: as partículas que possuem massa e evoluem no tempo de acordo com as leis de Newton, e as ondas eletromagnéticas, entidades sem massa que se propagam através do espaço, evoluindo no tempo de acordo com as leis de Maxwell do eletromagnetismo.

O mundo microscópico, entretanto, não obedece às leis da física clássica, e, sim, às leis da física quântica. Os constituintes do mundo atômico e subatômico, átomos, moléculas e partículas subatômicas, possuem massa e são os componentes microscópicos da matéria. Quanto à radiação, como veremos adiante, também é formada por partículas microscópicas, porém não dotadas de massa.

A estrutura atômica foi objeto de estudo sistemático no começo do século XX, quando os cientistas estudaram detalhadamente vários fenômenos, tais como os raios-X, a radioatividade e o efeito fotoelétrico. As pesquisas sobre o efeito fotoelétrico, por exemplo,

mostraram, conclusivamente, que a luz possui também um caráter tipicamente corpuscular e que não pode ser concebida só em termos de uma onda. Do ponto de vista clássico, isso parecia contraditório porque o fenômeno de interferência da luz parecia comprovar, em definitivo, que a luz possui caráter ondulatório.

As explorações realizadas do mundo microscópico trouxeram resultados inesperados, revelando *anomalias* que os cientistas não conseguiam explicar com base em noções clássicas. Aos poucos, os físicos foram tomando consciência de que as noções da física clássica não eram suficientes para se compreender o mundo microscópico. Em busca de respostas, foi sendo formulada uma nova física, a *física quântica*, com alterações radicais em relação à física clássica que trata de fenômenos macroscópicos.

A física quântica é todo um corpo de conhecimentos desenvolvido a partir do início do século XX, com o qual se procura descrever um mundo fantástico e muito diferente daquilo a que estamos acostumados – o mundo microscópico. Trata principalmente dos fenômenos que ocorrem nessa escala de tamanho e do modo como esses fenômenos refletem o que acontece na escala macroscópica. A física clássica é todo um corpo de conhecimentos desenvolvidos até o fim do século XIX, o qual parecia ser completo porque explicava praticamente todos os fenômenos observados até então. Conta-se que o físico alemão Max Planck, um dos responsáveis pelo surgimento da física quântica, teria sido aconselhado por um de seus mestres a desistir de seus estudos científicos e escolher a carreira de pianista, assim, os cientistas da época estavam condenados a ficar sem ter o que fazer! Afinal, estava quase tudo pronto, faltavam apenas dois pequenos detalhes. Os dois detalhes que os físicos não conseguiam explicar estão representados pelos “tijolos que faltam” na Figura 3.

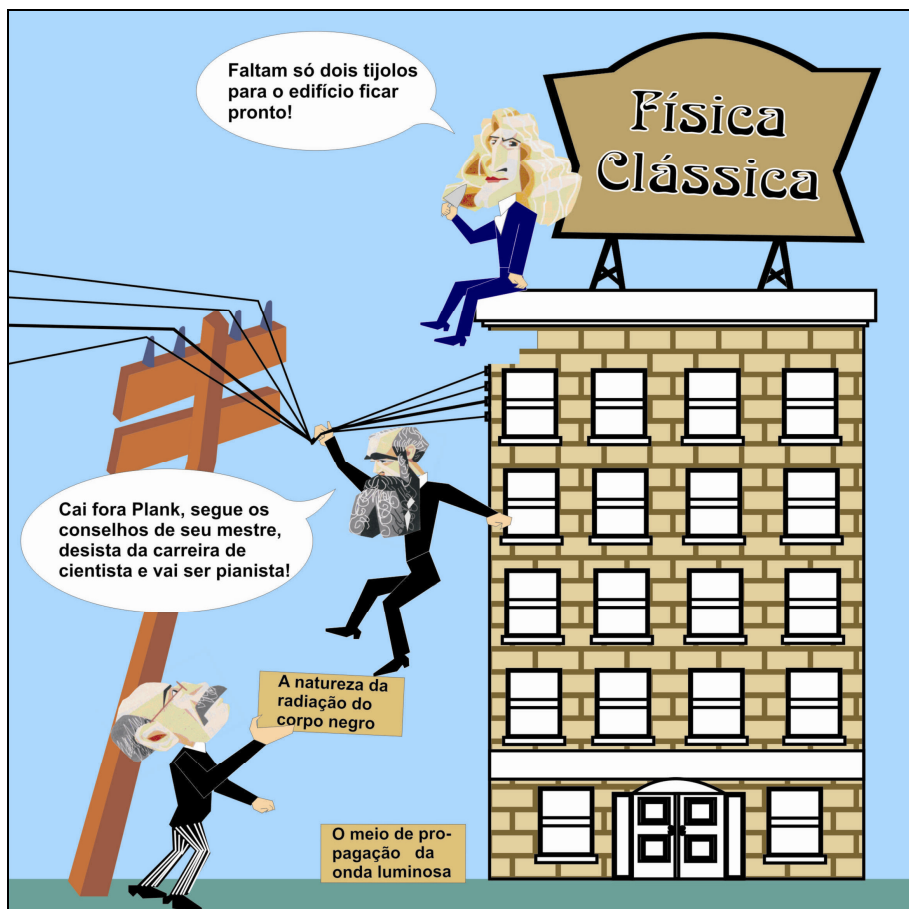


Figura 3 – O edifício da física clássica

Um tanto arbitrariamente, podemos situar o nascimento da física quântica em 14 de dezembro de 1900, quando, numa reunião da Sociedade Alemã de Física, o físico alemão Max Planck (1858-1947) apresentou seu artigo “sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”, que se constituiu num verdadeiro marco de uma revolução na física. O artigo de Planck propunha uma explicação para o problema do espectro de emissão da chamada “radiação do corpo negro”, radiação eletromagnética que é emitida por um corpo negro em equilíbrio térmico a uma dada temperatura. Conhecer o espectro de emissão de um objeto macroscópico qualquer é, basicamente, saber quanta energia radiante é emitida pelo objeto em cada faixa de comprimento de onda ou de frequência. Essa informação está contida na curva de um gráfico em que o eixo vertical corresponde à intensidade luminosa emitida (a quantidade de energia emitida por unidade de superfície e por unidade de tempo, medida em Watt/m^2 em unidades do SI) e, o eixo horizontal, ao comprimento de onda ou à frequência da radiação emitida. A curva obtida, em função da frequência da radiação emitida pelo corpo, para diferentes temperaturas, está ilustrada na Figura 4.

No final do século XIX, os físicos experimentais já conseguiam realizar medidas muito precisas do espectro de emissão de um corpo negro, com base nas quais eles obtiveram *empiricamente* a curva do espectro de radiação do corpo negro com grande precisão.

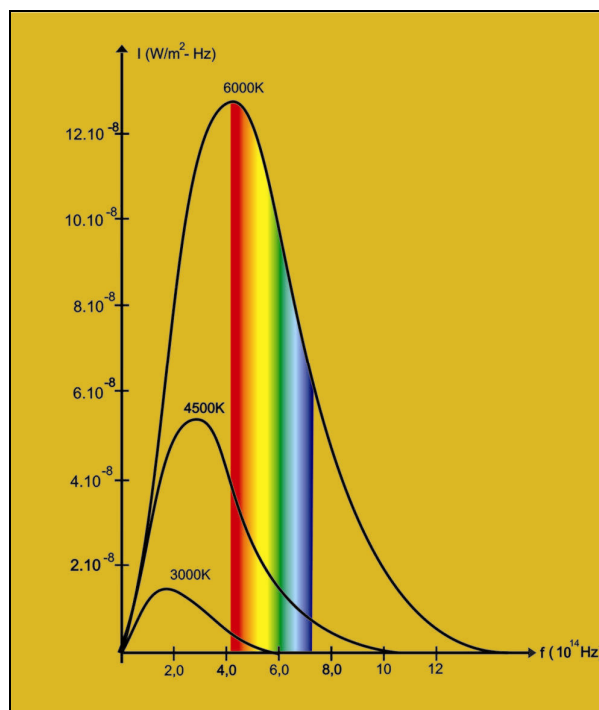


Figura 4 – Espectro de emissão de um corpo negro

Entretanto, faltava ainda, deduzir essa curva teoricamente, a partir das leis mais fundamentais da física. Esse era o objetivo de Planck naquele final de ano de 1900. Ele conseguiu fornecer uma solução para o problema teórico da radiação de corpo negro, obtendo a curva correta que os experimentais já haviam obtido empiricamente, porém, para isso, Planck foi forçado a atribuir propriedades quânticas à luz. Mais especificamente, Planck foi forçado a usar um modelo em que a radiação eletromagnética só trocava energia com a matéria em quantidades *quantizadas*, isto é, quantidades de energia que são *múltiplas inteiras* de uma quantidade *mínima* de energia, que ele denominou de *quantum* (plural *quanta*).

Cinco anos depois, em 1905, Einstein usaria a proposta de Planck para explicar convincentemente o efeito fotoelétrico. Contudo, a hipótese de Planck foi usada por Einstein

com uma interpretação radicalmente diferente daquela dada por Planck: para Einstein, não apenas as trocas de energia entre a radiação e a matéria são quantizadas, mas a própria luz o é! Noutras palavras, Einstein propôs um novo modelo corpuscular para a luz ou a radiação eletromagnética em geral, no qual a radiação é considerada discreta, formada por um número inteiro de entidades microscópicas sem massa, mas dotadas de energia e de *momentum* linear. Einstein denominou-as “quanta de luz” (plural de “quantum de luz”). Hoje chamamos de *fóton* ao que Einstein denominava “quantum de luz”. Assim, de acordo com Einstein, podemos considerar a luz e a radiação eletromagnética em geral como um feixe de fótons.

Em 1911, o físico britânico Ernest Rutherford (1871-1937) descobriu a existência do núcleo atômico. A partir das observações realizadas por ele e por sua equipe, Rutherford propôs um modelo atômico no qual o átomo era quase que totalmente vazio, com um minúsculo *núcleo* extremamente denso, constituído por partículas positivas – os prótons – e uma região externa, a *eletrosfera*, formada por partículas negativas – os elétrons –, que giram em torno do núcleo descrevendo órbitas circulares. Este modelo “planetário” do átomo, entretanto, tinha, do ponto de vista teórico-clássico um sério ponto fraco. De acordo com a teoria eletromagnética, qualquer carga em movimento acelerado deve emitir radiação e, portanto, perder continuamente energia em forma de ondas eletromagnéticas. No caso do modelo de Rutherford, elétrons negativamente carregados descreveriam movimentos circulares em torno do núcleo e, portanto, teriam uma aceleração (centrípeta). Isso significa que, no modelo atômico de Rutherford, o elétron em órbita acabaria por perder toda a sua energia e colapsar para o núcleo. Além disso, um núcleo formado apenas por partículas positivas deveria se desintegrar, pois as cargas elétricas de mesmo sinal se repelem mutuamente. Portanto, o modelo atômico proposto por Rutherford era instável do ponto de vista teórico e não explicava convincentemente a existência duradoura dos átomos.

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), que fizera seu doutorado em física teórica com Rutherford na Universidade de Manchester, começou a procurar uma solução que apoiasse a estrutura atômica “impossível” de Rutherford. Então, em 1913, Bohr aplicou a teoria quântica de Planck e de Einstein na estrutura atômica de Rutherford e formulou o primeiro modelo *quantizado* do átomo (mais tarde este modelo seria revisado por conter ainda graves defeitos).

O corpo de leis e modelos desenvolvido durante os primeiros 25 anos do século XX (1900-1925) ficou conhecido como a “velha física quântica”, por contraste com as descobertas teóricas e experimentais que se sucederiam rapidamente a partir de 1925 e que gerariam um novo corpo de conhecimentos, ainda maior e mais preciso, hoje conhecido como “mecânica quântica”.

A partir dos trabalhos pioneiros de Planck e de Einstein no início do século XX, gradativamente os físicos foram aceitando o fato de que as anomalias com as quais se deparavam eram inerentes ao mundo microscópico e não podiam ser explicadas com base na física do mundo macroscópico, ou seja, a física clássica.

Assim como para a mecânica clássica existem várias versões ou formulações matemáticas fisicamente equivalentes (a mecânica vetorial newtoniana, a mecânica lagrangeana, a mecânica hamiltoniana etc.), a mecânica quântica também pode ser apresentada em várias versões, todas fisicamente equivalentes. Esses desenvolvimentos constituem uma etapa crucial no desenvolvimento da física moderna. Pela primeira vez, os resultados físicos não eram derivados a partir de um modelo concreto do universo, mas de uma construção matemática abstrata.

A primeira versão da mecânica quântica chama-se “mecânica matricial” e foi formulada em 1925 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976). Esta teoria recebeu tal nome por se utilizar de matrizes para representar grandezas físicas. A segunda versão da mecânica quântica apareceu no início de 1926, quando o físico austríaco Erwin Schrödinger

(1887-1961) formulou a chamada “mecânica ondulatória”. Teoria que é uma generalização do postulado de Broglie e recebeu esse nome por possuir fortes analogias com a teoria clássica da luz, a óptica ondulatória; é a versão mais utilizada pelos físicos em geral. Ainda no ano de 1926, o inglês Paul Dirac (1902-1984) desenvolveu uma terceira versão da mecânica quântica.

O sucesso da mecânica quântica foi uma grande conquista científica do século XX pelo fato de prever o comportamento observado dos sistemas físicos microscópicos, isto é, desenvolve conceitos consistentes e adequados para descrever o mundo em escala microscópica e para fazer previsões a respeito, confirmando-as ou não em experimentos de grande precisão.

2. Objetos clássicos e objetos quânticos

Os sistemas físicos são caracterizados pelo seu *estado*, o qual é definido pelos valores assumidos por um conjunto mínimo de *grandezas* físicas, que são *propriedades mensuráveis* dos objetos. As propriedades de um sistema são quaisquer características avaliáveis do mesmo, cujos valores revelam as condições em que se encontra o sistema.

Portanto, existe um *conjunto mínimo* de grandezas físicas que define o *estado* de um sistema físico qualquer. Podemos exemplificar o *estado mecânico* de um sistema macroscópico usando como exemplo o mais simples de todos os sistemas deste tipo, ou seja, aquele constituído por uma única partícula clássica de massa m . Associando a essa partícula uma representação matemática, o seu estado será representado por um conjunto de seis números (x, y, z, p_x, p_y, p_z) , onde x, y e z são as coordenadas cartesianas que informam sobre a posição da partícula e p_x, p_y e p_z são as componentes cartesianas do vetor *momentum* linear (ou quantidade de movimento de translação, definida como $p = m.v$) da partícula. Usando notação vetorial, mais condensada, podemos denotar o estado desse sistema muito simples pelo ordenado de vetores (r, p) . Tacitamente, na física clássica se assume que esses dois observáveis vetoriais (ou seis observáveis escalares) sejam compatíveis entre si (o que é experimentalmente comprovado para objetos macroscópicos deste tipo). Se o sistema for uma onda eletromagnética, o seu estado clássico será especificado pela quantidade de energia (ou o *momentum* linear) que ela transporta consigo, sua frequência (ou seu comprimento de onda), sua polarização e sua direção e sentido de propagação.

O estado termodinâmico de um objeto macroscópico qualquer é definido por conjunto mínimo (ou seja, de menor número possível) de propriedades termodinâmicas do sistema. As propriedades termodinâmicas fundamentais que variam com o transcorrer do tempo são denominadas de *propriedades dinâmicas*, de que são exemplos a posição, a velocidade e a energia. As propriedades não fundamentais do sistema são aquelas que podem ser expressas como combinações das propriedades fundamentais. As propriedades também podem ser classificadas como *internas*, as quais são intrínsecas ao sistema, ou *externas*, aquelas que dependem dos movimentos ou das posições das partes que formam o sistema em relação a corpos externos a este, ou seja, que não pertencem ao sistema considerado.

As propriedades dinâmicas de um sistema são também muitas vezes denominadas *variáveis de estado* ou *observáveis*. Na física clássica, para sistemas formados por objetos macroscópicos, os observáveis são grandezas que podem sempre ser medidas *simultaneamente*, ou seja, ao medirmos o valor de uma determinada grandeza, não alteraremos os valores das outras; e se forem medidas em sequência, uma após a outra, a ordem em que dois observáveis quaisquer serão medidos não influenciará os resultados obtidos para as duas. E mais, abstraindo-se o ato de medir, podemos dizer que, para os objetos clássicos ou macroscópicos, essas variáveis de estado estão bem definidas *simultaneamente* em todos os instantes de tempo, mesmo quando não estamos realizando qualquer medição das

mesmas. Vamos denominar este tipo de observáveis – que podem ser medidos simultaneamente e que estão simultaneamente bem definidos – de *observáveis compatíveis*. Além disso, podemos atribuir uma série de propriedades dinâmicas *bem definidas* em cada instante de tempo aos objetos e sistemas clássicos; a partir delas, usando as leis da física clássica, somos capazes de explicar racionalmente os resultados e fazer previsões precisas sobre o comportamento futuro dos objetos clássicos.

Podemos também preparar um *estado clássico* o que significa estabelecer condições iniciais para o sistema, essas definidas pelos valores iniciais (em $t = 0$) daquelas grandezas que definem de maneira completa o estado do sistema clássico. A evolução temporal de um estado clássico é regida pela segunda lei de Newton e é determinista, isto é, dado um estado inicial qualquer e as forças que agem sobre o objeto, os estados futuros estarão determinados.

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

O sucesso da mecânica quântica está além do limite macroscópico, uma vez que ela se adapta aos resultados da mecânica clássica para objetos macroscópicos, isto é, a mecânica quântica aplicada a objetos macroscópicos fornece resultados iguais aos obtidos pela mecânica clássica. A recíproca não é verdadeira. Os objetos macroscópicos são formados por inúmeros objetos quânticos (os átomos). Portanto, qualquer sistema quântico formado por N objetos quânticos menores necessariamente tende a ser um objeto clássico quando N tende ao infinito, ou seja, no limite de N muito grande, a física quântica deve tender e se reduzir à física clássica. Chamamos a isso de *Princípio da Correspondência*, que foi postulado por Bohr em 1923. Basicamente, o princípio da correspondência nos diz que, para uma nova teoria ser validada ou corroborada, deve prever os mesmos resultados válidos que já eram previstos pela teoria antiga.

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

Em virtude dessas diferenças, a maneira como são definidos os estados de objetos quânticos é inteiramente diversa da maneira como isso é feito na física clássica. O movimento de objetos macroscópicos é regido por equações diferenciais, ou seja, equações cujas soluções não são números, mas, sim, *funções reais* das coordenadas espaciais e do tempo. Fisicamente, as grandezas descritas por essas equações nos fornecem valores que normalmente são alterados a cada instante. Por exemplo, para o caso em que a força resultante exercida sobre um corpo de massa m for nula, a segunda lei de Newton $F_R = m.a$ (uma equação diferencial) tem como solução a função horária $r = r_0 + v.t$, que descreve a posição r de uma partícula clássica num instante t qualquer.

Analogamente, o movimento de objetos na escala microscópica é regido pela equação de Schrödinger, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger e que pode ser escrita na forma sintética:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H . \Psi$$

Onde H é um operador diferencial (ou seja, que contém derivadas em sua definição) chamado *Hamiltoniano*. Esta entidade matemática representa o observável energia total do sistema (e $\hbar$ é a constante de Planck normalizada, definida como $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J.s}$).

A equação de Schrödinger também é uma equação diferencial, mas descreve as variações em *ondas de probabilidade* associadas a uma partícula quântica (o elétron, por exemplo) sob a ação de forças externas, bem diferente, portanto, do que é descrito pelas equações newtonianas da mecânica clássica.

A entidade matemática que descreve o estado de um sistema quântico é sua *função de onda*, representada pela letra grega (maiúscula) Ψ , que é solução da equação de Schrödinger. A função de onda contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve, ou seja, ela é o próprio estado do sistema quântico. A equação de Schrödinger foi apenas apresentada, entretanto a sua solução, a função de onda, precisa ser compreendida detalhadamente, de modo que voltaremos a falar da Ψ mais detalhadamente no tópico 9.

3. Elétrons e fótons

Foi o físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940) quem descobriu os *elétrons* em 1897, através da confirmação de que os raios catódicos são formados por feixes de minúsculas partículas com cargas elétricas negativas (e de mesmo valor), mais tarde chamadas de elétrons. Thomson descobriu que os elétrons possuem carga elétrica ao comprovar que eles eram desviados na presença de um campo elétrico e/ou de um campo magnético. Por meio da direção e do sentido em que essas partículas eram desviadas, Thomson concluiu que suas cargas elétricas são negativas e chamou-os de *elétrons*.

Os elétrons são completamente todos idênticos entre si. Entre outras propriedades físicas, eles possuem o mesmo tamanho (um raio menor que 10^{-18} m), a mesma massa (aproximadamente igual a $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) e a mesma carga elétrica (aproximadamente $-1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Às vezes, quando ligados em átomo, os elétrons são comparados aos planetas do sistema solar. Essa analogia é imprecisa em vários aspectos, como já mencionamos anteriormente a respeito do modelo atômico de Rutherford. Uma das razões é que os movimentos dos elétrons são diferentes do movimento dos planetas em torno do Sol porque os elétrons não obedecem às leis da física clássica, e, sim, às leis da mecânica quântica.

Não é inteiramente correto conceber os elétrons como “bolinhas em rotação”, embora essa imagem nos seja a mais familiar e “confortável” para a nossa maneira de pensar, baseada no mundo macroscópico a que temos acesso pelos nossos sentidos. Embora os elétrons não sejam como as bolinhas do mundo clássico, realmente possuem um tipo de rotação que é uma característica intrínseca dos mesmos, isto é, todos os elétrons giram da mesma forma, sem importar a direção em que tal rotação é medida, e o valor de sua quantidade de movimento de rotação é sempre o mesmo para todos os elétrons encontrados na natureza. O *spin* ou *momentum angular intrínseco* está relacionado com a rotação dos elétrons em torno de si mesmos e tem o mesmo valor para todos os elétrons. Dependendo do sentido de rotação, um elétron tem *spin up* (para cima) ou *spin down* (para baixo).

Os *fótons* não foram inicialmente descobertos experimentalmente pelos físicos, e, sim, *propostos*. Em seu artigo de 1905 sobre o efeito fotoelétrico, do qual falaremos posteriormente, Einstein propôs pela primeira vez a existência do fóton (que ele chamava então de “quantum de luz”), quando postulou que a luz pode ser encarada como sendo formada por corpúsculos ou partículas de luz sem massa e sem carga elétrica, através dos quais a luz interage com a matéria como se fosse formada por minúsculos corpúsculos ou “pacotes” de energia eletromagnética. Estes foram originalmente chamados por Einstein de

quanta de luz (*quanta* é plural de *quantum*, palavra que vem do latim e significa “quantidade”). Um *fóton*, portanto, é um *quantum* de luz. O nome fóton foi cunhado somente em 1926 pelo físico Gilbert Newton Lewis (1875-1946).

Uma diferença notável entre fótons e outras partículas é que eles podem ser facilmente criados e destruídos. A interação de fótons com outras partículas eletricamente carregadas resulta na força eletromagnética, isto é, o fóton é a partícula mediadora da interação eletromagnética. A energia de um fóton formador de radiação eletromagnética de frequência f é dada pela relação de Planck, $E = h.f$. É a energia dos fótons que determina se são fótons de luz visível, de raios X, de ondas de rádio etc. E como qualquer objeto de massa nula, os fótons propagam-se sempre com a velocidade da luz, quaisquer que sejam suas energias e em relação a qualquer observador. Assim como os elétrons, os fótons também possuem *spin*, mas o valor do *spin* do fóton é um, ao passo que do elétron é 1/2.

A confirmação experimental dos fótons aconteceu pela primeira vez em 1923 com os experimentos de Arthur Holly Compton (1892-1962) e sua equipe, ao constatarem que raios X espalhados por superfícies metálicas polidas apresentam alteração de sua frequência em razão do espalhamento. (De acordo com a física clássica, os raios X espalhados deviam possuir a mesma frequência que a dos raios X incidentes.). O *Efeito Compton*, como é hoje conhecido (ou seja, a alteração das frequências dos raios X espalhados), evidenciou que a frequência da luz diminui em quantidade dependendo do ângulo em que for espalhada.

Em nosso curso, os elétrons e os fótons serão usados como modelo de objetos quânticos elementares, ou seja, sem estrutura interna.

4. Revisando a ótica ondulatória

Antes de seguirmos adiante com o curso, faremos uma breve revisão de alguns conceitos referentes à ótica ondulatória que são muito importantes para o seu seguimento.

4.1. Propriedades fundamentais de uma onda

O termo “onda” está presente em muitas situações e é usado com muita frequência no nosso dia-a-dia. Ouvimos falar em ondas de rádio, ondas de televisão, microondas ou mesmo as ondas do mar, todas com a mesma função: transmitir energia. Uma onda é uma perturbação que se propaga no espaço, transmitindo energia, sem que haja, entretanto, transporte de matéria junto com a onda.

A representação gráfica de uma onda qualquer é feita através de uma função de coordenadas e do tempo, denominada genericamente de *função de onda*. Para um tipo de ondas muito especiais, denominadas *harmônicas*, a função de onda é uma função senoidal (*seno* ou *coseno* ou uma combinação linear das duas). A Figura 5 mostra a representação gráfica de uma onda deste tipo com os seus principais elementos.

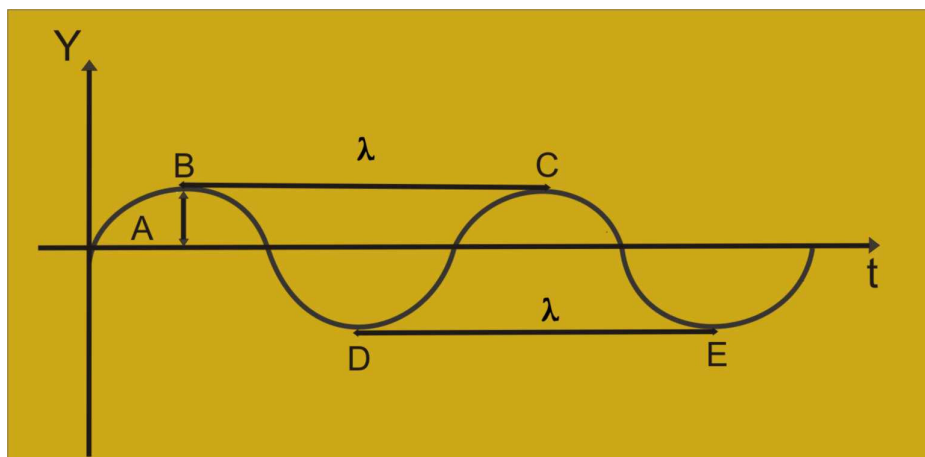


Figura 5 – Representação gráfica de uma onda

Onde:

A = amplitude da onda, que representa o máximo afastamento em relação ao ponto de equilíbrio;

B, C = cristas ou picos, que representam o ponto mais alto da onda;

D, E = vales ou depressões, que representam o ponto mais baixo da onda;

λ = comprimento de onda, que é a distância entre duas cristas ou vales sucessivos.

4.2. Princípio de Huygens

Imaginemos que, ao jogar uma pedra em águas calmas, produzamos ondas na superfície da água, semelhantes às ondas mostradas na Figura 6. Imaginemos também que as cristas de ondas mostradas na figura formem círculos que tenham o mesmo centro (concêntricos). Esses círculos concêntricos são chamados de *frentes de onda*.

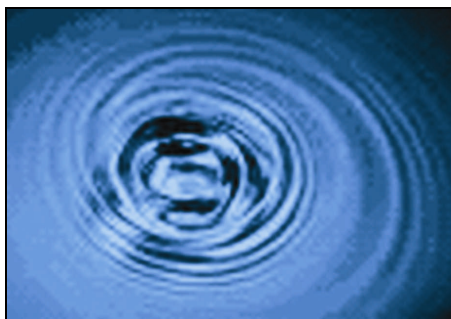


Figura 6 – Ondas formadas na água

O físico holandês Christian Huygens (1629-1695) propôs que cada ponto de uma frente de onda qualquer, produzida por uma fonte qualquer, comporta-se como uma *fonte puntiforme* para novas *ondas secundárias*, que se propagam a partir deste ponto. Em outras palavras, as frentes de onda que se propagam a partir de uma fonte qualquer podem ser consideradas como a superposição das cristas de pequenas ondas secundárias, cada qual tendo sido emitida a partir de um ponto da frente de onda num instante anterior; após um intervalo de tempo, todas se somam, produzindo, assim, uma nova frente de onda resultante, em outra posição do espaço e correspondente a um instante de tempo posterior. Quando as ondas formadas estão a uma distância muito grande da fonte, podemos considerá-las como formando uma superfície aproximadamente plana (frente de onda plana). As ondas planas podem ser geradas, por exemplo, dentro de uma cuba retangular contendo água, onde é produzido um movimento de vai-e-vem de uma régua. Observamos na Figura 7 (a) o princípio de Huygens ilustrado para uma frente de onda plana e, na Figura 7 (b), ilustrado para uma frente de onda esférica.

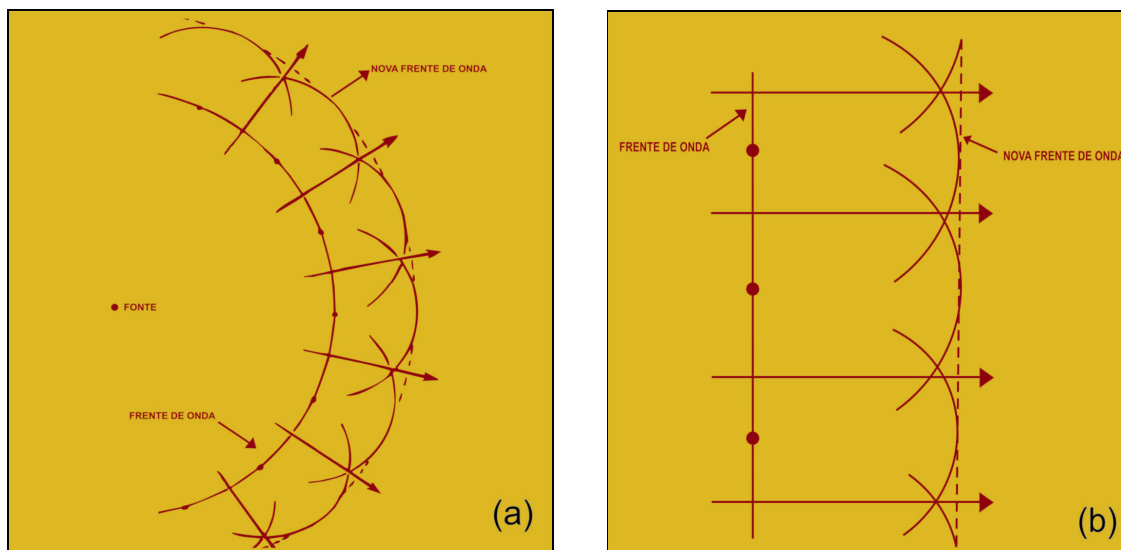


Figura 7 – Princípio de Huygens aplicado a frentes de ondas.

4.3. Difração

A *difração* pode ser explicada pelo princípio de Huygens. O fenômeno da difração ocorre quando uma frente de onda encontra um obstáculo ou uma fenda, passa por ele/ela e se espalha lateralmente (ou se difrata) do outro lado do obstáculo ou da fenda, com cada um de seus pontos constituindo uma fonte puntiforme de uma onda secundária. Para que o fenômeno da difração seja observado nitidamente, é necessário que as dimensões do obstáculo ou da abertura sejam da ordem de grandeza do comprimento da onda incidente. A difração ocorre para qualquer tipo de onda e, através dela, por exemplo, um obstáculo pode ser contornado. Nas ondas sonoras, por exemplo, é o fato de a onda poder contornar um obstáculo que nos permite escutar a voz de uma pessoa que nos chama, mesmo quando essa pessoa se encontra atrás de um obstáculo. A Figura 8 ilustra ondas planas atravessando aberturas de diferentes tamanhos.

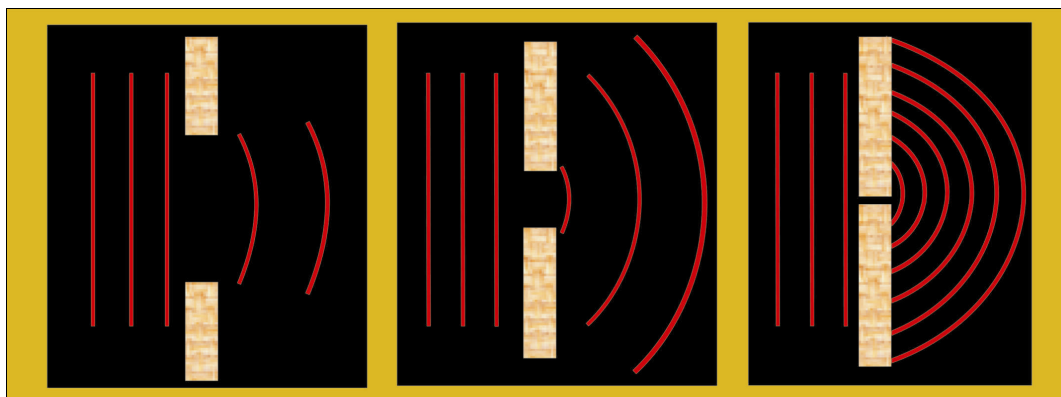


Figura 8 – Ondas planas atravessando fendas de diferentes larguras

A difração também ocorre com a luz, porém é mais difícil percebermos a difração de ondas luminosas porque os obstáculos ou as aberturas em que a luz incide são normalmente bastante grandes em relação ao comprimento de onda da luz usada. Entretanto, se fizermos a luz passar por orifícios cada vez menores, passaremos a observar com facilidade cada vez

maior os efeitos da difração (sempre) existente. Podemos comprovar isso fazendo uma simulação computacional num *applet*¹⁵. Com o simulador, pode-se realizar uma demonstração virtual da difração da luz através de uma fenda única. O *applet* possibilita trabalhar com diferentes tamanhos para a abertura do obstáculo (fenda) e, também, a troca de cores (alterações do comprimento de onda) da luz. Outro recurso muito importante proporcionado pelo simulador é a visualização do gráfico da distribuição da luz difratada através da fenda única.

4.4. Superposição linear

Sabemos que um corpo material não pode ocupar simultaneamente a mesma região do espaço que outro. Quanto às ondas, uma onda pode ocupar a mesma região no espaço que outra no mesmo instante? E, se ocuparem a mesma região no espaço, uma não acabaria interferindo na propagação da outra? Como podemos explicar isso?

Duas ou mais ondas podem passar, sim, simultaneamente pela mesma região do espaço. Quando isso acontece, as ondas se *superpõem*, isto é, se somam algebricamente, ponto a ponto no espaço, para produzir uma onda resultante. A superposição de ondas não altera a propagação de cada onda; apenas seus efeitos se somam, acentuando-se ou reduzindo-se, quando estão passando simultaneamente pelo mesmo lugar do espaço, *dependendo da diferença entre suas fases individuais*.

Duas ondas de mesmo comprimento de onda estão *em fase* se a diferença de fase entre elas for nula ou igual a um número inteiro qualquer de comprimentos de onda. Se as ondas estão em fase, combinam-se *aumentando* sua amplitude; se estiverem *fora de fase*, combinam-se *reduzindo* sua amplitude. Novamente podemos comprovar virtualmente esse fenômeno fazendo uma simulação computacional com outro *applet*¹⁶. Essa simulação computacional demonstra o princípio da superposição para dois pulsos que se cruzam, em fase ou fora de fase, e de maneira completa ou parcial. Através de sua manipulação, podemos comprovar que, após os pulsos de onda se encontrarem na mesma região do espaço e se combinarem, voltam a se propagar como se nada tivesse acontecido.

4.5. Interferência

O fenômeno da combinação de ondas que acabamos de abordar é o da *interferência*, e se refere apenas à amplitude da onda, não a sua propagação. A superposição de pulsos de onda em fase, portanto, é denominada *interferência construtiva*, e a superposição de pulsos de onda totalmente fora de fase, *interferência destrutiva*. Em outras palavras, se duas ondas chegarem a um anteparo qualquer em fase, a combinação (soma algébrica) das duas somará seus efeitos; se duas ondas chegarem a um anteparo qualquer completamente fora de fase, a combinação reduzirá o efeito final em relação aos efeitos que seriam provocados individualmente por cada uma das ondas sozinha. A interferência é uma característica típica de *qualquer* movimento ondulatório e pode ser notada em muitos fenômenos do nosso dia-a-dia. Sugerimos que sejam realizadas no mínimo duas experiências reais onde podemos observar a interferência da luz que passa por uma fenda dupla¹⁷ e a interferência da luz que passa por um fio de cabelo¹⁸, antes de seguirmos com essa revisão¹⁹.

¹⁵ O *applet* está disponível em <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/difracao/difracao.htm>

¹⁶ O *applet* está disponível em <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/superposicao/superposicao.htm>

¹⁷ Disponível em: http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6_otica_fisica/exp2_otica_fisica.pdf

¹⁸ Disponível em: http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6_otica_fisica/exp3_otica_fisica.pdf

¹⁹ Os endereços são apenas sugestões pois existem vários experimentos reais que demonstram o fenômeno da interferência que podem ser utilizados.

Um aspecto bastante importante referente às fontes das ondas é a questão de sua *coerência*. Duas fontes de onda são consideradas coerentes se a diferença entre suas fases individuais (diferença de fase) não mudar com o tempo quando essas ondas se encontram. Em outras palavras, é preciso que as fontes mantenham constante sua diferença de fase, mesmo quando cada fase individual varia com o tempo.

4.6. Polarização

Como acabamos de ver, a difração e a interferência aplicam-se a qualquer tipo de movimento ondulatório. Em contrapartida, a *polarização*, fenômeno que passaremos a abordar, é uma propriedade exclusiva das ondas *transversais*.

Ondas transversais são aquelas em que a direção de propagação e a direção de vibração da onda são transversais, isto é, mutuamente perpendiculares. Como exemplos, podemos citar o movimento vibratório para cima e para baixo, produzindo uma onda numa corda, ou o movimento, oscilatório do campo elétrico da luz, se considerarmos o modelo ondulatório clássico da mesma. Ondas longitudinais, ao contrário das transversais, são aquelas em que a direção de propagação e a direção de vibração são coincidentes. As ondas sonoras são os exemplos mais familiares de ondas longitudinais.

Como referimos anteriormente, somente as ondas transversais podem ter polarização. Vamos usar o exemplo da luz para explicar o fenômeno da polarização. Polarizar *linearmente* a luz significa fazer o campo elétrico da luz oscilar num mesmo plano enquanto ela se propaga; polarizar *circularmente* a luz significa fazer o campo elétrico da onda luminosa da luz girar em torno de um eixo, mantendo sua amplitude constante, ou seja, a direção de polarização da onda é, por definição, a direção de oscilação de seu *campo elétrico*. Portanto, a luz pode ser polarizada. A luz emitida pelo Sol ou por lâmpadas comuns, ou a luz refletida pelos objetos, é não-polarizada ou apenas parcialmente polarizada (no caso da luz refletida por objetos). Contudo, como já mencionamos, podem vir a ser polarizadas se as fizermos atravessar *filtros polarizadores* de luz (filtros polaróides).

5. A experiência da dupla fenda e a natureza ondulatória da luz

5.1. Um pouco da história da luz

Uma das questões mais cruciais da história da ciência sempre foi a de descobrir se a luz é constituída por partículas ou por ondas. Essa é a questão da *natureza* da luz e tem-se notícia de que intrigou os homens desde a época dos gregos antigos.

Os gregos antigos acreditavam que a luz fosse formada por minúsculos grãos de algum tipo de matéria, certamente diferente da matéria ordinária. Alguns deles afirmavam que a luz estava presente nos nossos olhos, na forma de pequenas partículas emitidas, que, ao atingirem um objeto, tornavam-no visível. Essa idéia começou a ser questionada no início do século XVII e, em 1678, o astrônomo e físico holandês Christian Huygens (1629-1695) propôs que a luz seria composta por ondas. Segundo Huygens, a luz podia se propagar no vácuo (entre o Sol e a Terra, por exemplo) por existir uma substância invisível nessa região, uma substância sem massa, difusa e estática, chamada *éter luminífero*, que permearia todo o universo e os poros da matéria e que constituiria o meio de propagação das ondas luminosas.

Em 1704, em sua obra *Óptica*, Isaac Newton (1642-1727) descreveu todas as formas de comportamento e qualidades da luz, propondo também uma *teoria corpuscular da luz*, na qual a luz seria constituída por partículas ou corpúsculos de luz. Newton precisou valer-se de algumas hipóteses adicionais para conseguir explicar corretamente as leis da reflexão e refração, já então conhecidas. Entre as hipóteses auxiliares, Newton admitiu (erroneamente, hoje sabemos) que a velocidade de propagação da luz fosse maior na água, ou no vidro, do que no ar. Dada a grande influência de Newton durante os séculos XVIII e XIX, a teoria

corpuscular da luz foi aceita sem grandes questionamentos a partir de então, sobrepunhando largamente a teoria rival proposta por Huygens. Além de Christian Huygens, o físico inglês Robert Hooke (1635-1703) contrapunha-se à teoria de Newton para a luz, ao explicar a refração da luz com uma teoria ondulatória antiga, considerando que a luz se propagasse com velocidade menor na água, ou no vidro, do que no ar. Foram eles os principais defensores da teoria ondulatória da luz na época. Nessa época ainda não tinha sido observado o fenômeno de difração e acreditava-se então, que a luz se propagasse sempre em linha reta. Esse foi um dos motivos que levaram Newton a rejeitar a teoria ondulatória da luz.

Essa situação perdurou até o início do século XIX. Em 1801, o médico Thomas Young (1773-1829) corroborou a teoria da natureza ondulatória da luz com seu famoso experimento da fenda dupla.

5.2. O experimento de Young

Nesse experimento, Young demonstrou que a luz sofre interferência, um fenômeno comum a todos os tipos de onda. O esquema do experimento de Young está mostrado, esquematicamente, na Figura 9.

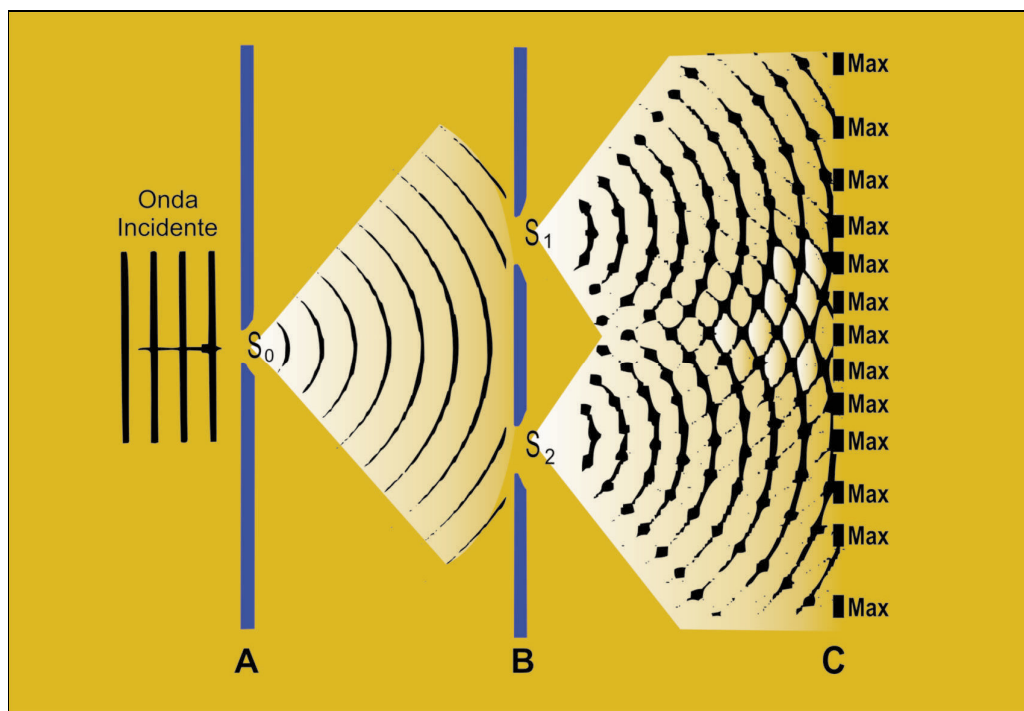


Figura 9 – Esquema experimental de Young

Uma fonte de luz monocromática incidente ilumina a fenda S_0 do anteparo A, onde é difratada pela fenda, espalhando-se em várias direções; ao chegar ao anteparo B, a luz é dividida em dois feixes e novamente difratada pelas fendas S_1 e S_2 ; daí eles seguem, então, para uma tela branca, C, onde se combinam ponto a ponto e dão origem a um padrão de franjas claras e escuras alternadas, típico de interferência ondulatória. Esse padrão característico é conhecido pelo nome de *padrão de interferência*. No anteparo C, os pontos claros são aqueles onde as ondas sofrem interferência *construtiva*, o que ocorre quando as ondas provenientes das duas fendas chegam ao anteparo com fases iguais (em fase). O conjunto desses pontos constitui uma *franja clara*. Em outros pontos, as ondas sofrem interferência totalmente *destrutiva*, o que ocorre quando as ondas ali incidentes estão

completamente fora de fase (ou seja, com uma diferença de fase igual a π radianos). O conjunto desses pontos forma uma *franja escura*.

O padrão de intensidade produzido em razão da interferência tem o aspecto mostrado na Figura 10(a), não o da Figura 10(b), o que mostra que o padrão resultante da iluminação produzida pelas duas fendas não é, simplesmente, a soma dos dois padrões obtidos com cada uma das fendas quando a outra está bloqueada. Se isso ocorresse, a intensidade luminosa na tela seria dada pela curva mostrada em azul na figura da direita, quando o que se vê, de fato, é o padrão de intensidade mostrado na figura da esquerda.

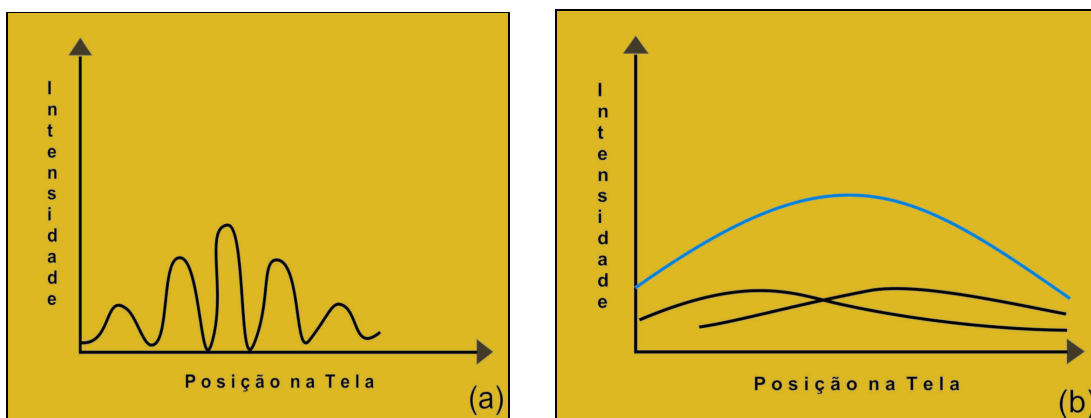


Figura 10 – Gráfico intensidade versus posição na tela

Na Figura 11 (a), a intensidade luminosa em cada ponto do anteparo C depende da diferença de distâncias percorridas pela luz nos caminhos seguidos pelos raios r_1 e r_2 , que chegam ao ponto P . Na Figura 11 (b), supondo que $D \gg d$, (onde D é a distância do anteparo B até a tela C e d , a distância entre as duas fendas) e que S_1 , S_2 e b constituam um triângulo retângulo com ângulo interno θ , pode-se mostrar que a diferença entre as distâncias percorridas é dada por:

$$\Delta L = d \cdot \sin \theta$$

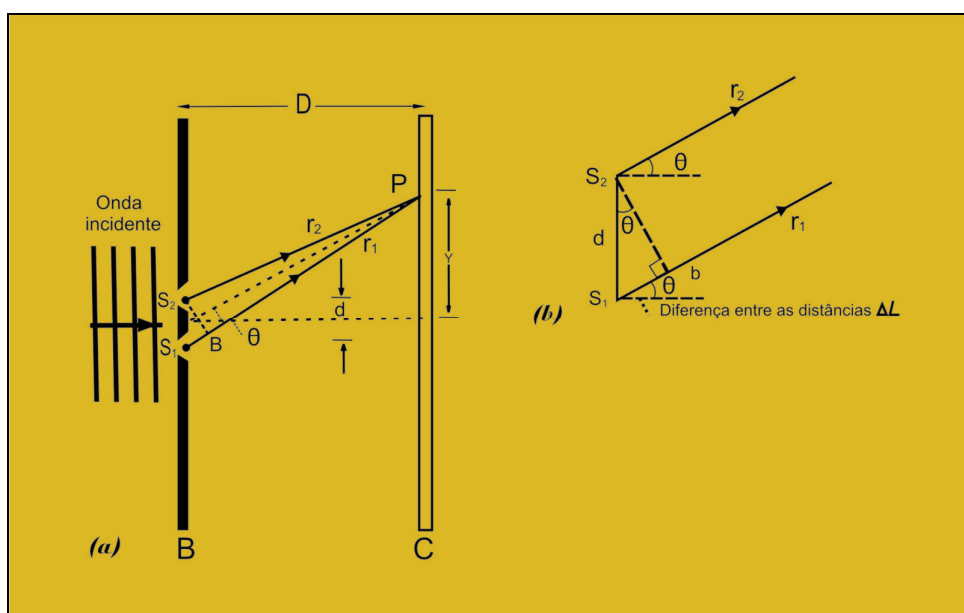


Figura 11 – Esquema de representação do arranjo experimental de Young.

Para haver uma franja clara, ΔL deve ser igual a zero ou a um número inteiro de comprimento de onda, isto é:

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

No caso de uma franja escura, portanto, ΔL deve ser igual a um múltiplo ímpar de meios comprimentos de onda, ou seja:

$$d \cdot \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \cdot \lambda \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

O padrão de interferência observado na experiência de Young também pode ser observado nas Figuras 12 (a) e 12 (b), que mostram a tela do *software* Doppelspalt, cujo *download* pode ser feito gratuitamente a partir do endereço <http://www.physik.uni-uenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html>, com o qual passaremos a trabalhar a partir de agora.

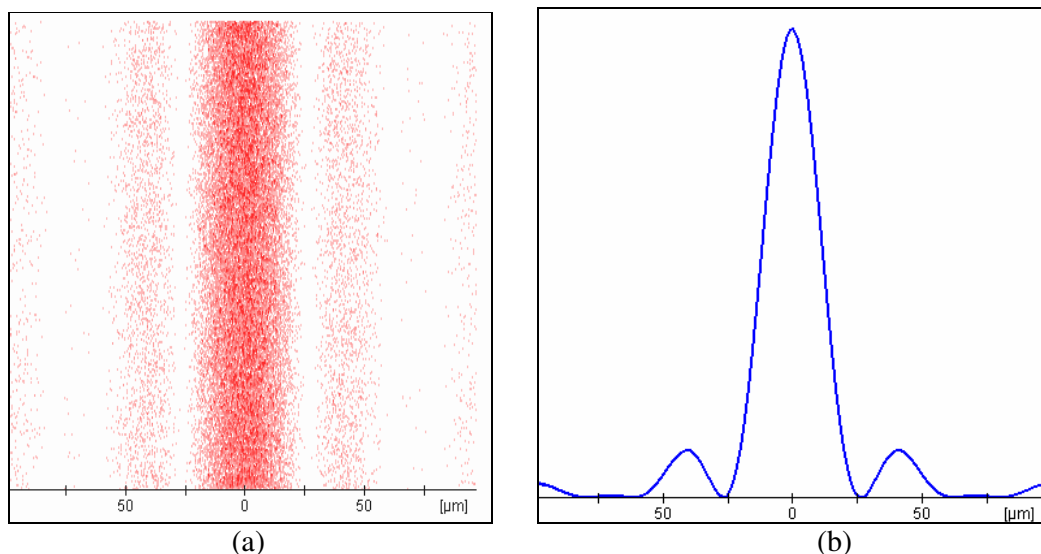


Figura 12 – Padrão de interferência visualizado na tela do *software* Doppelspalt.

A partir desse experimento, a *teoria ondulatória* da luz passou a predominar sobre a *teoria corpuscular* de Newton, tornando-se o alicerce teórico para a óptica ondulatória desenvolvida a partir de então e alcançando sua formulação físico-matemática definitiva na década de 1860, com o término da formulação do eletromagnetismo pelo físico inglês James Clerk Maxwell (1831-1879).

6. A experiência da dupla fenda e a natureza corpuscular da luz

O experimento de Thomas Young foi abordado em termos ondulatórios, quando uma luz monocromática é usada como fonte e atravessa duas fendas estreitas e próximas, produzindo numa tela um padrão de interferência semelhante ao que é mostrado na Figura 13.

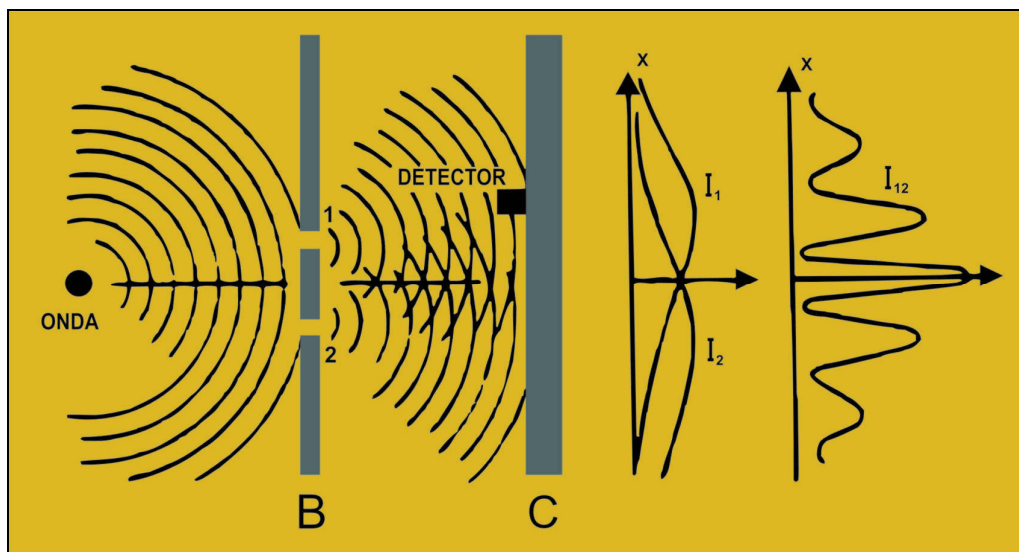


Figura 13 – Vista lateral do arranjo do experimento de Young

Vamos ver, agora, como o resultado observado na tela do arranjo de Young pode ser explicado pela teoria quântica da luz, ou seja, usaremos um outro modelo para a luz, não o modelo ondulatório clássico, em que a luz é considerada uma onda eletromagnética, mas um modelo corpuscular da luz, considerada como um feixe ou uma corrente de “partículas de luz”, chamadas de *fótons*. Como havíamos feito antes quando explicamos o experimento de Young com base na teoria ondulatória, vamos considerar que a fonte emite luz *monocromática*, ou seja, luz de uma única frequência (ou cor). Em termos da teoria quântica da luz, isso significa que todos os fótons emitidos pela fonte têm a mesma energia (lembre-se da relação de Planck, $E_{\text{fóton}} = h.f$). O número desses fótons *monoenergéticos* emitidos por segundo pela fonte é proporcional à grandeza que chamamos de intensidade luminosa na teoria ondulatória da luz.

A intensidade da onda, denotada pela letra I , representa a taxa média por unidade de área com a qual a energia é transportada, isto é, é a energia transportada por unidade de tempo e de área:

$$I = \frac{E/t}{A}$$

No modelo ondulatório, a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico da onda: $I \propto E^2$. No modelo corpuscular, a intensidade, é proporcional à energia transportada, a qual é, por sua vez, proporcional ao número de fótons incidentes, $I \propto N.h.f$, onde N é o número de fótons incidentes por unidade de tempo. De acordo com a mecânica quântica, essa grandeza, por sua vez, é diretamente proporcional à probabilidade de encontrá-los numa determinada região, ou seja, é proporcional ao quadrado da amplitude da função de onda. Portanto, se considerarmos conjuntamente os dois modelos para a luz, chegaremos à conclusão de que $E^2 \propto |\Psi^2|$.

Se diminuirmos a intensidade da fonte até que os fótons cheguem ao detector da tela C praticamente um a um, num intervalo de tempo de observação muito curto, obteremos a imagem registrada na Figura 14 (a), onde os pontos aparecem aleatoriamente um após o outro, cada qual correspondendo a cada fóton detectado na tela de maneira localizada. Ainda assim, quando apenas um fóton incide de cada vez, se esperarmos um tempo suficientemente longo para que muitos pontos se acumulem na tela, observaremos o gradual surgimento de um

padrão de interferência. Isso nos leva a concluir que cada fóton deve ter interferido *consigo mesmo* após ter ultrapassado a fenda dupla, como se tivesse passado simultaneamente pelas duas fendas! (essa situação será ilustrada com o uso do *software* da fenda dupla)

Quando o número N de fótons incidentes por unidade de tempo aumenta muito, aproximando-se dos valores da ordem daqueles que ocorrem normalmente em situações encontradas no nosso dia-a-dia, a distribuição dos impactos na tela começa a revelar um padrão não aleatório de pontos, como o mostrado na Figura 14 (b). Quando o valor de N aumenta ainda mais, o padrão delineado torna-se mais nítido, como o ilustrado na Figura 14(c).

Se a observação se estender por um tempo mais longo, aumentando, com isso, o número total, N , de fótons que já atingiram a tela, os pontos impressos passam a se agrupar em faixas bem definidas, dando origem ao padrão mostrado nas Figuras 14(b) e 14(c).

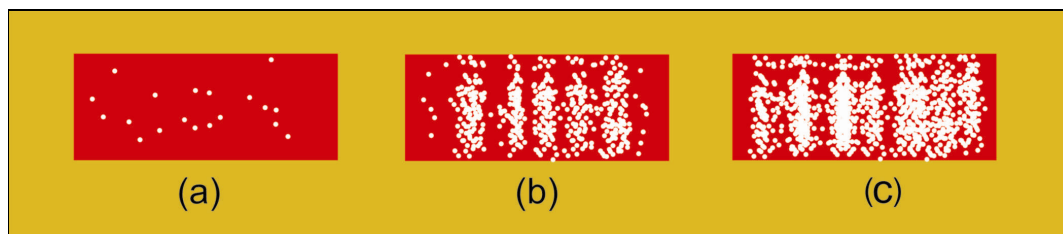


Figura 14 – Estágios da formação de um padrão de interferência produzido por dupla fenda.

Através do exemplo numérico, vamos verificar a relação entre o valor da intensidade luminosa e o número de fótons emitidos num determinado instante.

Exemplo 1: A mínima intensidade luminosa que o olho humano médio pode perceber é de aproximadamente 10^{-10} W/m^2 . Se a radiação incidente possui comprimento de onda de 5.600 Angstroms, quantos fótons entram por segundo na pupila do olho sob essa intensidade? Pode-se tomar a área de uma pupila típica como sendo igual a $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Solução:

Sendo $I = \frac{E/t}{A}$, então: $E = (10^{-10} \text{ w/m}^2) \times (0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (1 \text{ s})$
 $E = 5.10^{-15} \text{ J}$

Sendo $E = N.h.f$, então $N = 1,4075.10^4 \text{ fótons/s}$

Se uma das fendas for coberta, impedindo-se a passagem de fótons através dela, observaremos na tela um padrão de difração de fenda única parecido com o que é mostrado na Figura 15. Agora os fótons incidem em pontos da tela que antes não atingiam quando as duas fendas estavam abertas.



Figura 15 – Padrão de difração produzido por fenda única

Isso acontece porque o fóton que incide na tela comporta-se agora como uma partícula clássica, bem localizada e que passa por apenas uma das fendas, sem revelar qualquer sombra de um comportamento tipicamente ondulatório, ou seja, concluímos que um fóton pode apresentar tanto propriedades corpusculares quanto ondulatórias, dependendo do arranjo experimental que se utiliza para efetuar o experimento com ele! Em contrapartida, admitindo que um objeto quântico tenha também um caráter ondulatório, podemos usar as propriedades ondulatórias associadas a comprimento de onda, entre essas a relação de Broglie ($\lambda = \frac{h}{p}$).

7. Dualidade onda-partícula para luz: onda eletromagnética x feixe de fótons

Sob determinadas condições, a radiação eletromagnética apresenta propriedades *tipicamente ondulatórias*, tais como *difração*, *interferência* e *polarização* (o experimento de Young constituiu uma manifestação basicamente da interferência). Sob outras condições, porém, a radiação eletromagnética comporta-se como se fosse constituída por um *feixe de partículas*. Esses aspectos corpusculares da luz só foram revelados pela primeira vez em experimentos realizados nas primeiras décadas do século XX, embora o efeito fotoelétrico, de 1887 constitua de fato uma manifestação desse caráter. Nesse modelo corpuscular a radiação eletromagnética é considerada como sendo um feixe ou uma corrente de *partículas de luz*, ou quanta de luz, chamadas atualmente de *fótons*.

Dessa forma, a radiação revela um “duplo caráter” físico, o que significa dizer que se comporta como onda sob determinadas circunstâncias e como partículas sob outras. Nenhuma das teorias – ondulatória e corpuscular – explica sozinha todos os aspectos e comportamentos da radiação observados na natureza. Não faz sentido dizer que a radiação “é” uma onda eletromagnética, ou “é” um feixe de fótons, mas, sim, que é descrita pela física com dois modelos matemáticos concorrentes – o modelo ondulatório e o modelo corpuscular. Portanto, as ondas eletromagnéticas não são fenômenos puramente ondulatórios nem puramente corpusculares.

O fato de a natureza da luz deixar de poder ser considerada somente como ondulatória foi inicialmente revelado, como afirmamos, no efeito *fotoelétrico*, que não podia ser explicado corretamente com base na teoria ondulatória da luz. Foi Einstein quem, em seu artigo de 1905 sobre o efeito fotoelétrico, propôs o novo modelo corpuscular da luz, juntamente com o conceito de *quantum de luz*. Outros experimentos, porém, especialmente concebidos para testar a hipótese de Einstein, revelaram que, sob determinadas condições (ou seja, para determinados arranjos experimentais), a radiação realmente se comporta como se fosse formada por um feixe de fótons. Um desses experimentos cruciais foi o de espalhamento de raios X em superfícies metálicas, realizado repetidas vezes e com muita precisão por Compton e sua equipe nos primeiros anos da década de 1920. A partir dele, a comunidade dos físicos começou a, gradualmente aceitar a validade da hipótese de Einstein para explicar o comportamento observado da radiação.

Paradoxalmente, a observação do efeito fotoelétrico aconteceu quando Heinrich Hertz realizava experiências para confirmar a existência das ondas eletromagnéticas, em 1887. Hertz observou que, quando a radiação luminosa ultravioleta incidia sobre um eletrodo negativamente carregado e feito de um metal alcalino, promovia uma descarga elétrica (corrente elétrica) entre esse eletrodo e o outro (carregado positivamente). Isso constituía uma indicação de que os elétrons conseguiam sair da superfície do metal do eletrodo negativamente carregado pela absorção de energia a partir da luz incidente. Nos anos que se seguiram a sua descoberta, o efeito fotoelétrico passou a ser estudado detalhadamente com arranjos experimentais que consistiam, basicamente, numa câmara lacrada onde era feito

vácuo, contendo numa das extremidades uma placa de metal alcalino ligada ao pólo negativo de uma bateria, um coletor metálico do lado oposto ao da câmara, ligado ao pólo positivo da bateria, uma fonte de tensão contínua, um voltímetro e um amperímetro, conforme mostrado na Figura 16.

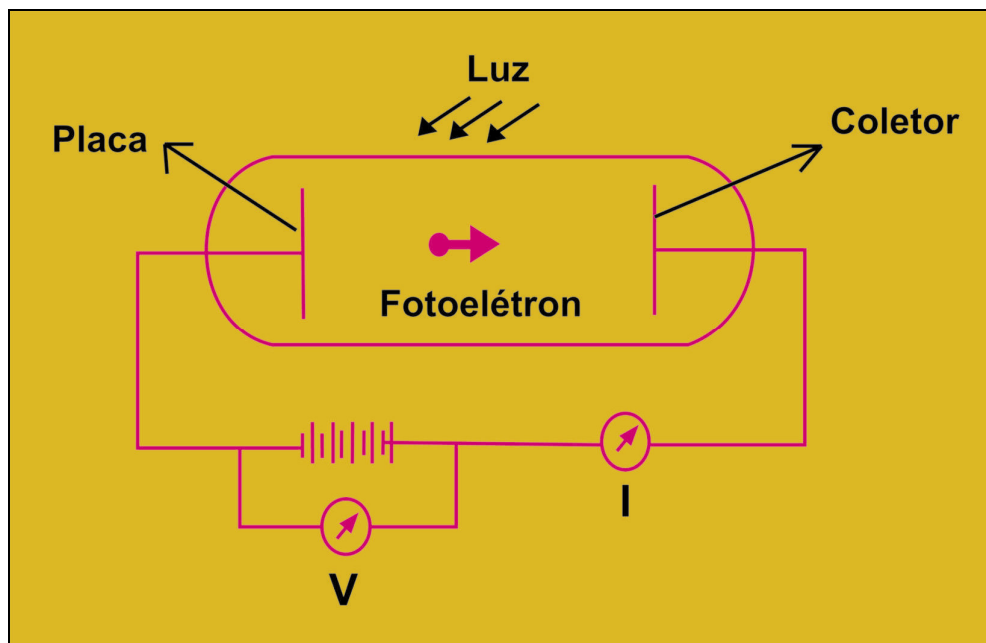


Figura 16 – Arranjo experimental do efeito fotoelétrico

Entre os dois eletrodos é mantida pela bateria uma diferença de potencial cuja polaridade podia ser invertida, de modo que os elétrons ejetados do metal (chamados de fotoelétrons) alcalino pudessem ser tanto acelerados quanto freados em seu caminho em direção à outra placa. Quando a luz bate na placa, vários de seus elétrons superficiais adquirem energia da radiação incidente suficiente para que se libertar do campo eletrostático, que os atrai de volta para a placa alcalina, e abandonam o metal com uma determinada quantidade de energia cinética. Esses elétrons, portanto, passam a contribuir para a corrente elétrica entre as duas placas, que podia ser medida através do amperímetro. Para o caso em que a diferença de potencial entre as placas está com polaridade invertida em relação à da figura mostrada acima, um aumento do valor absoluto dessa voltagem provoca portanto, uma diminuição da corrente elétrica da descarga. O valor mínimo de potencial de freamento para o qual a corrente cessa totalmente é chamado de *potencial de corte*. Neste caso, todos os fotoelétrons provenientes da placa emissora são freados o suficiente para que nenhum deles, nem mesmo os mais energéticos, alcance a placa coletora. Isso significa, então, que a energia cinética dos fotoelétrons mais energéticos é toda convertida em energia potencial elétrica no momento em que o elétron pára e começa a inverter seu movimento. Assim, medindo-se o valor do *potencial de corte* podia-se determinar a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos, com velocidade máxima, a partir da placa alcalina.

Entretanto, o comportamento observado nesses experimentos não podia ser explicado de acordo com algumas considerações da teoria ondulatória clássica da luz. Havia, basicamente, três resultados experimentais que não podiam ser explicados pela física clássica:

1^o - Como mostrado na Figura 17, a corrente elétrica fluía somente para valores de potencial de freamento superiores ao do potencial de corte (V_F na figura). Este comportamento era idêntico para várias intensidades de luz ultravioleta incidente, embora o

valor do potencial de corte fosse sempre o mesmo, ou seja, a energia cinética máxima dos fotoelétrons independe da intensidade da luz, ao passo que a física clássica prediz que a energia cinética dos fotoelétrons deveria aumentar sempre que a intensidade da luz aumentasse!

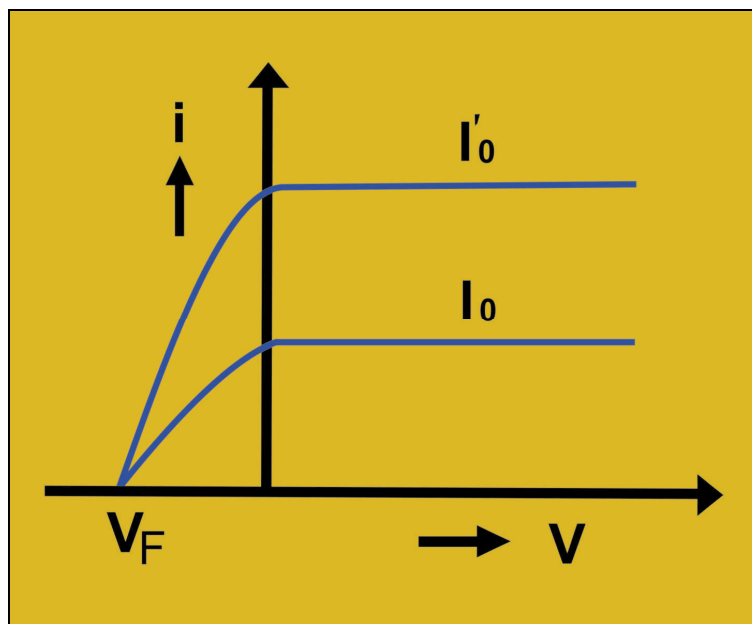


Figura 17 – Gráfico da corrente i em função do potencial V . Os dados foram obtidos com o aparelho da Figura 16.

2^o – Para *qualquer* que fosse o valor da intensidade de iluminação, existia um valor mínimo de frequência da luz abaixo do qual o efeito fotoelétrico não ocorria. Isso indicava que a energia cinética dos fotoelétrons dependia da frequência da luz usada, mas não de sua intensidade. Entretanto, de acordo com a teoria eletromagnética de Maxwell, a energia cinética dos fotoelétrons deveria independe da frequência da luz, mas ser dependente da intensidade luminosa!

3^o – Não parecia haver um intervalo de tempo de retardo detectável entre o instante em que a luz incidia sobre a placa e o instante em que surgia a corrente de descarga. Mas a teoria clássica da luz exigia que, a fim de acumular energia suficiente para sair do metal, os elétrons deveriam ficar absorvendo energia a partir da radiação durante certo intervalo mínimo de tempo, que corresponderia ao *tempo de retardo* esperado entre a incidência da luz e o aparecimento da corrente elétrica.

Einstein explicou o efeito fotoelétrico propondo uma nova versão da velha teoria ondulatória clássica da luz, qual seja, a hipótese de que a luz é formada por pacotes concentrados de energia ou *quanta* de luz, chamados atualmente de *fótons*. Com essa hipótese, ele conseguiu explicar com simplicidade as três anomalias descritas acima:

1^o – No primeiro caso, no qual a energia cinética não depende de intensidade da luz, a teoria dos quanta admite que, ao aumentar a intensidade da luz, é o número de fótons incidentes que aumenta e, conseqüentemente, a corrente fotoelétrica também, mas não a energia cinética máxima desses elétrons, pois tal energia viria da absorção de um fóton, cuja energia depende da frequência, não da intensidade da luz.

2^o – No segundo caso, no qual a frequência da luz incidente deveria ter um valor mínimo (f_0), Einstein argumentou que, quando a energia cinética do fotoelétron é nula, o fóton doador deve possuir uma energia exatamente necessária para ejetar os elétrons; e que, quando a frequência é menor do que f_0 , os fótons incidentes não possuem a energia suficiente para doar aos elétrons e, assim, conseguir fazer com que vençam a atração eletrostática da placa emissora e saiam dela para formar a corrente de descarga. Enquanto os elétrons se afastam da superfície da placa emissora, o campo elétrico produzido por esta realiza um trabalho negativo (correspondente ao freamento dos elétrons) de valor absoluto igual a w_0 , que Einstein denominou função-trabalho do metal, ou seja, do total de energia que o elétron absorve ao absorver um fóton ($h.f$), uma parte fica com o metal (w_0) e o restante, com o fotoelétron, na forma de energia cinética. Isso que expressamos com palavras pode ser simbolicamente expresso pela equação (Einstein, 1905).

$$K = hf - w_0$$

$$K = 0 \quad \rightarrow \quad hf = w_0$$

3^o – No terceiro caso, a ausência de retardamento é automaticamente explicada, pois a energia é absorvida pelos elétrons da placa emissora de uma só vez, em “pacotes” inteiros (fótons), não de forma gradual, a partir do campo elétrico de uma onda eletromagnética, como pensavam os físicos clássicos.

São indiscutíveis as contribuições que Einstein nos trouxe com seus trabalhos, especialmente para a natureza da luz. Nos dias de hoje evidenciamos o efeito fotoelétrico em muitas aplicações do ponto de vista tecnológico, tais como visores noturnos, fotômetros, dispositivos eletrônicos que controlam as portas de elevadores etc.

A partir daí, a radiação eletromagnética, até então explicada apenas como sendo uma onda eletromagnética, passou a ter também um caráter corpuscular. Do ponto de vista filosófico, a descoberta do comportamento dual da onda-partícula representou um marco do pensamento racional.

8. A experiência da fenda dupla com feixe de elétrons

O experimento de fenda dupla também pode ser realizado com feixes de objetos microscópicos, idênticos e dotados de massa. Nosso protótipo desse tipo de objeto microscópico será o *elétron*. O que podemos esperar como resultado desse experimento levado a cabo com um feixe de elétrons, em vez de luz (que é um feixe de fótons sem massa)? De acordo com tudo que aprendemos em toda a nossa experiência de vida e de nossa relação com o mundo material a este respeito, se os elétrons são partículas massivas, então deveriam se comportar como bolinhas muito pequenas (dotadas de carga elétrica, além de massa), mas essencialmente bolinhas, nada mais que isso.

A partir daí, a experiência cotidiana nos sugere que tal experimento seria muito parecido com uma brincadeira que consiste em atirar um feixe de bolas – bolas de tênis, digamos – em alta velocidade e uma de cada vez (imagine-se uma grande máquina construída para essa finalidade, uma espécie de “metralhadora de bolas de tênis”) contra uma parede de cimento onde existissem duas janelas (as “fendas”). As janelas têm seus centros separados por uma determinada distância d . Uma vez que as bolas são de grande velocidade, todas conseguiriam chegar à parede e algumas conseguiriam entrar na sala que existe após a parede, atravessando-a em alta velocidade e atingindo uma parede que se encontra do lado oposto da sala. Para melhorar ainda mais a analogia com a situação da experiência de fenda dupla com elétrons, poderíamos imaginar também que as bolas de tênis atiradas pela máquina saíssem

todas pintadas com uma leve camada de tinta vermelha e que as paredes da sala após a parede de porta dupla fossem pintadas de branco e, inicialmente, sem nenhuma marca.

Se a finalidade da nossa máquina não fosse a de atirar bolas de tênis, mas, sim, de produzir ondas na água, observaríamos que as ondas se espalhariam por toda a parede além da janela. E com as bola de tênis, o efeito observado seria o mesmo? Como você, leitor, acha que seria a aparência da parede oposta da sala após termos esperado tempo suficiente para que um número muito grande de bolas de tênis tenha sido arremessado pela máquina?

Diferentemente das ondas produzidas na água, cada bola atingirá a parede em apenas uma posição. Vamos imaginar ,inicialmente, que apenas uma das janelas está aberta. Embora algumas das bolas ricocheteiem nas bordas da janela, a probabilidade de uma bola passar pela janela é muito maior do que a de ela bater na borda da janela e ser desviada lateralmente. Se esperarmos por algum tempo, vamos verificar que as marcas deixadas na parede oposta vão gradualmente revelando um padrão. A maior parte das bolas incide na parede oposta numa região situada aproximadamente entre as duas linhas perpendiculares à parede e que passam pelas bordas laterais da mesma. Fora dessa região, o número de marcas diminui rapidamente, tanto para um lado como para outro. Podemos visualizar o padrão resultante na Figura 18, onde usamos o *software* Doppelspalt para uma fonte de balas de espingarda na mesma situação descrita acima (somente uma fenda aberta). Um padrão semelhante é observado quando for a outra janela que estiver aberta, apenas com um pequeno deslocamento para o lado da nova janela aberta. Essa distribuição resultante de marcas corresponde à densidade de probabilidade de uma bola atravessar a sala e colidir com a parede oposta na vizinhança de um determinado ponto quando apenas uma das janelas está aberta.

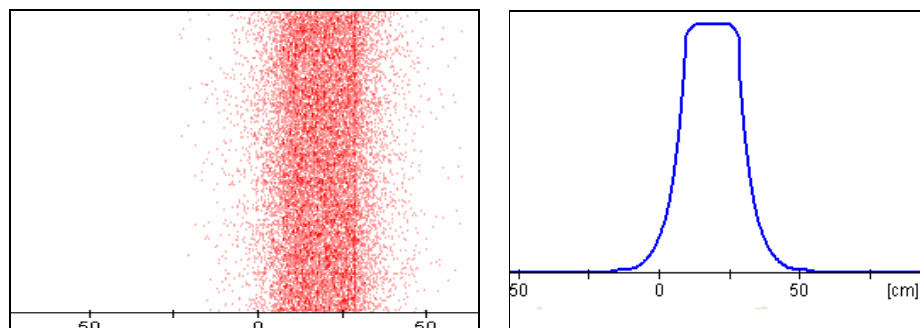


Figura 18 – Lado esquerdo: Padrão observado no *software* Doppelspalt quando a fonte é uma metralhadora e apenas uma das fendas está aberta. Lado Direito: Gráfico do número de impactos na tela em função da posição na mesma. O centro do gráfico é um ponto da tela diretamente à frente do centro da fenda.

Continuando com nossa brincadeira, vamos agora imaginar que as duas janelas estejam abertas. Neste caso, o que você imagina que acontece com as marcas de bolas na parede oposta à medida que o número de impactos vai se tornando muito grande? A distribuição das marcas que as bolas deixam na parede oposta da sala, isto é, sua distribuição, será parecida com a do caso anterior?

Certamente, com as duas janelas abertas aumenta o número total de bolas que incidem na parede oposta da sala. Com o decorrer do tempo, observamos que vai surgindo gradualmente um padrão na distribuição das marcas, com duas regiões onde existem altas concentrações de marcas de impacto, centradas em pontos separados por uma distância aproximadamente igual à que existe entre os centros das janelas (d). Essa distribuição resultante, na verdade, nada mais é do que a soma de duas distribuições, como a da Figura 18, mas deslocadas por uma distância aproximadamente igual a d , como podemos observar na Figura 19. Essa distribuição resultante de marcas corresponde à densidade de probabilidade de

uma bola atravessar a sala e colidir com a parede oposta na vizinhança de um determinado ponto quando ambas as janelas estão abertas.

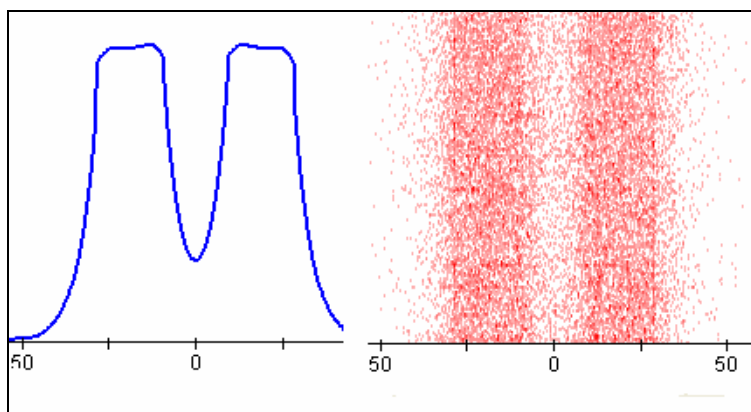


FIGURA 19: Padrão observado no *software* Doppelspalt quando a fonte são balas de metralhadora e as duas fendas estão abertas. A distância aproximada d entre os centros dos dois picos do gráfico é de 50 unidades.

Entretanto, o que nos garante que as bolas não interferem entre si, como ocorre com as ondas no experimento de Young, quando foi comprovada a interferência da luz que passa por duas fendas? Ou as bolas não poderiam ricochetear umas contra as outras, desviando-se por todos os lados? Isso não seria um tipo de interferência? Sim, seria, mas, para que isso ocorra, as bolas deveriam ter saído da máquina ao mesmo tempo, o que não acontece. (Imagine-se a situação ilustrada na Figura 20, em que nossa máquina fosse semelhante a uma metralhadora. Suas balas não sairiam ao mesmo tempo da metralhadora, mas uma de cada vez, embora com alta frequência.) Ou seja, cada bola deve ter passado por uma ou por outra janela, mas não por ambas ao mesmo tempo!



Figura 20 – Balas de metralhadora incidindo em duas fendas

E se usarmos elétrons no lugar de bolas? Vamos deixar de lado a nossa metralhadora de bolas de tênis e imaginar agora que a fonte seja um filamento aquecido capaz de emitir elétrons, os quais são colimados na saída da fonte, formando um feixe direcionado (como se

fosse um canhão de elétrons). Que padrão você acha que será agora observado na tela (semelhante à nossa “parede do lado oposto da sala” da analogia anterior)? Como você acha que o resultado do experimento de duas fendas poderia ser interpretado neste caso? O padrão observado na parede, que agora será representado por pontos causados pelos impactos dos elétrons numa tela pintada com tinta sensível aos impactos. O padrão de impactos que vai se formando à medida que o tempo passa será o mesmo observado com as bolas de tênis?

Para quantificar a distribuição dos elétrons na tela, podemos usar um contador de Geiger, posicionado em cada posição da mesma, o qual nos permite realizar uma contagem cumulativa dos impactos numa vizinhança daquele ponto. A Figura 21 é uma representação esquemática de como fica o arranjo experimental de Young quando a fonte passa a ser de elétrons. O padrão de impactos das bolas de tênis e o padrão resultante dos impactos eletrônicos estão mostrados juntos, para comparação, no lado direito da figura. O padrão mostrado mais à direita corresponde ao dos impactos de elétrons na tela.

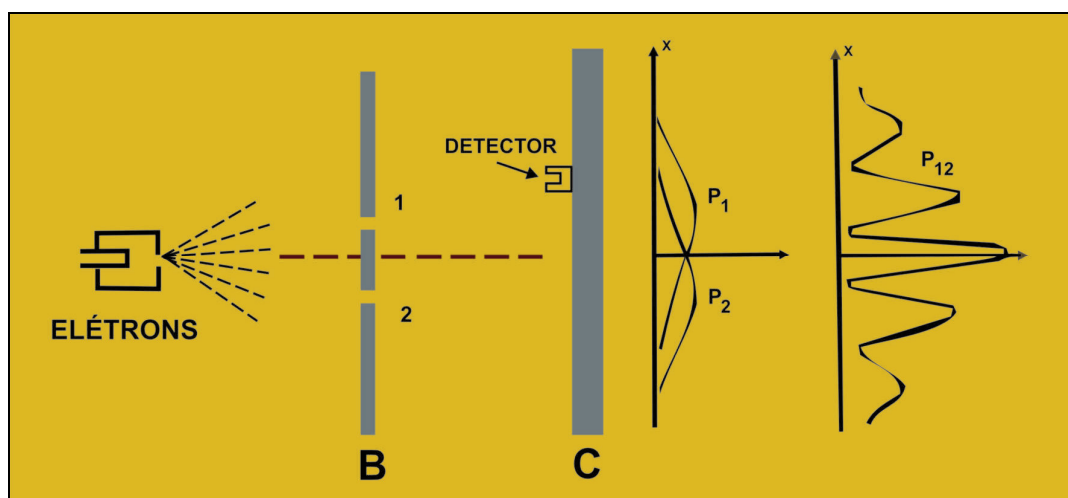


Figura 21 – Arranjo experimental de Young com elétrons. O padrão mostrado mais à direita corresponde ao dos impactos de elétrons na tela.

Assim que o filamento aquece bastante e começa a emitir elétrons, observamos na tela C que um padrão começa a se formar e fica evidente que a distribuição é muito diferente daquela obtida com as bolas de tênis da experiência imaginária anterior, pois os elétrons detectados na tela não diminuem tanto para um lado como para outro, mas, sim, distribuem-se em bandas, com espaços negros entre elas, em regiões onde poucos elétrons ou nenhum elétron chega, exatamente como no caso do experimento de Young para a radiação eletromagnética. O padrão observado é o mesmo da interferência com luz! Ou seja, neste experimento, os elétrons estão se comportando como se fossem ondas. Será que isso está acontecendo porque o número de elétrons emitidos é muito grande? O que observaríamos se fosse emitido apenas um elétron de cada vez, de maneira que apenas um deles incide no anteparo de fenda dupla e também na tela de cada vez? Antes de ler as observações registradas abaixo, use o *software* Doppelspalt e verifique por sua conta.

As observações registradas são as seguintes:

1. O detector só registra números inteiros de elétrons, pois nunca chegam até ele elétrons fracionados (podemos comparar essa característica para partículas clássicas como balas de metralhadoras ou *sprays*);
2. Se a fonte de elétrons for muito fraca, eles chegarão ao detector ao acaso e praticamente *um a um*. Podemos medir a distribuição de probabilidade correspondente a ter uma só fenda aberta (que é igual a P_1 ou P_2), ou a duas fendas abertas ($P_{1,2} \neq P_1 + P_2$). Mesmo

com a intensidade da fonte muito fraca, se esperarmos por um tempo suficientemente longo, obteremos uma figura de interferência tal qual a obtida com as ondas luminosas;

3. Se uma das fendas for fechada, os elétrons detectados na tela acumulam-se formando um típico padrão de difração de fenda única, com franjas brilhantes laterais a uma central. Isso é bem diferente do caso das bolas de tênis atiradas contra uma única fenda (janela), que não formam um padrão como esse, pois seu comprimento de onda é muito pequeno em relação à largura das fendas. Isso faz com que as franjas de difração fiquem tão juntas que se superpõem, resultando numa região com iluminação mais ou menos uniforme, sem franjas. Por isso não as notamos no caso de objetos macroscópicos dotados de massa.

As observações destacadas nesse experimento distribuem-se da seguinte maneira: as observações 1 e 2 são características de partículas clássicas, mas a observação 3 tem característica de ondas! Como conciliar isso? Como podemos aceitar esse comportamento aparentemente contraditório e muito estranho? Só temos uma conclusão plausível:

Os elétrons (ou outras partículas quânticas) não se comportam *nem como partículas clássicas nem como ondas clássicas*, embora, dependendo do experimento que se realize, revelem possuir propriedades de *ambas*.

Esse experimento nos mostra que elétrons e outras partículas quânticas compartilham do caráter ondulatório com o eletromagnetismo clássico, assim como as radiações eletromagnéticas compartilham com as partículas clássicas um caráter corpuscular da forma como Einstein postulou: pacotes de energia para a radiação.

Se partículas quânticas, tais como elétrons e fótons, possuem tanto propriedades corpusculares quanto ondulatórias, o que você pensa a respeito das partículas macroscópicas? Elas não poderiam também apresentar esse comportamento *dual*, ou seja, apresentar ora um comportamento tipicamente corpuscular, ora um tipicamente ondulatório?

Essa questão foi abordada em 1923-1924 pelo físico francês Louis de Broglie quando desenvolvia sua tese de doutoramento em física teórica. Ele, então, propôs que aquilo que chamamos de partículas ou corpos, por serem feitos de matéria, seriam, na verdade, *ondas de matéria*, de maneira que o comportamento dual (isto é, ora de onda, ora de partícula ou corpúsculo), até então apenas associado à radiação eletromagnética, também se aplicaria à matéria. Assim, para a matéria também a energia está relacionada com a frequência de uma onda associada, como no caso da radiação: $E = h.f$. De acordo com De Broglie, todos os corpos – elétrons, fótons, átomos, balas de metralhadoras, pessoas, animais ou planetas – possuem um comprimento de onda dado por uma relação que já foi vista no tópico 5:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \text{ onde } p = m.v.$$

Na relação de De Broglie (como é chamada a equação acima), grandezas características de partículas (energia e *momentum*) estão agora associados a grandezas características de ondas (frequência e comprimento de onda), através da constante de Planck (h).

Se todos os corpos apresentam, além de propriedades corpusculares, também propriedades ondulatórias, por que não evidenciamos isso no nosso cotidiano? Se isso acontece, não poderíamos dizer, por exemplo, que as balas que saem de uma metralhadora, ao invés de seguirem em linha reta, deveriam apresentar efeitos típicos de difração e de interferência, como padrões de franjas obtidos com feixes de metralhadora.

Os efeitos ondulatórios não são observados em objetos macroscópicos porque os comprimentos de onda desses corpos são muito pequenos, de tal modo que a interferência e a difração são desprezíveis. Já com objetos quânticos, dotados de quantidades de movimento muito menores e que correspondem a comprimentos de onda muito maiores, a difração pode ser apreciável. Da mesma forma, não evidenciamos a natureza ondulatória da propagação da luz em ótica geométrica porque as dimensões dos equipamentos utilizados (como lentes,

espelhos ou fendas) são bastante grandes quando comparados com o comprimento de onda da luz.

9. A função de onda e a natureza probabilística da teoria quântica

Agora que confirmamos em nossas atividades virtuais o caráter ondulatório das partículas, que confirma a hipótese de De Broglie, vamos verificar qual grandeza física explica a natureza dessas ondas. Como podemos associar uma função ao movimento de uma partícula microscópica? Qual o tipo de descrição que temos para os movimentos em escala microscópica?

As respostas às nossas questões foram objetos de estudo de muitos físicos e, depois de várias tentativas sem nenhum sucesso, verificou-se que nenhuma grandeza física até então conhecida explicava a natureza dessas ondas. Para tentar solucionar essa questão, foi proposta uma função de Onda, a função ψ (Ψ), da qual tratamos, juntamente com uma interpretação física para a mesma.

O destaque histórico da época foi para dois grandes nomes: Edwin Schrödinger, em 1926, e Max Born, em 1927. Schrödinger destacou-se pela descoberta da equação que leva o seu nome, a qual determina a evolução temporal da função de onda Ψ associada a objetos microscópicos. Como mencionamos no tópico 2, a entidade matemática que descreve o estado de um sistema quântico é sua função de onda Ψ , que é uma solução da equação de Schrödinger. A função de onda contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve, ou seja, podemos identificá-la como o próprio estado do sistema quântico, pois é ela que define completamente o estado do sistema quântico correspondente. Contudo, mesmo fornecendo todas as informações de que se pode dispor sobre o estado quântico do sistema, o número dessas informações é limitado, e essas limitações são inerentes à natureza, não se trata de limitações tecnológicas. Por exemplo, para um elétron, é uma função de posição e do tempo, mas não do *momentum*. Isso tem íntima relação com o princípio da incerteza de Heisenberg (1927), mas, mesmo sendo limitadas, de forma alguma essas informações podem ser consideradas incompletas. A versão de Schrödinger da teoria quântica, através de sua equação de onda, foi denominada *mecânica ondulatória*.

A função de onda Ψ , entretanto, não é uma função real. Trata-se de uma função *complexa*. Como o próprio nome sugere, uma função complexa por si mesma não pode representar uma grandeza física, mensurável, pois possui uma parte imaginária. A própria Ψ , portanto, não possui um significado físico direto. Somente grandezas ou observáveis reais possuem um significado físico direto e podem ser medidas através de experimentos e instrumentos. Matematicamente, isso significa que a Ψ possui uma parte real e uma parte imaginária e que deve ser escrita na forma geral $a + b.i$, onde a e b são funções reais e i é a unidade imaginária, definida como $i = \sqrt{-1}$.

Como a função de onda Ψ é complexa, usando um pouco de álgebra, depois de multiplicá-la pelo seu complexo conjugado, obtém-se o resultado $|\Psi|^2$, que é o *módulo* (valor absoluto) da *função ao quadrado*, que é uma função *real*, não complexa. Essa função, sim, possui um significado físico direto e fornece a probabilidade, por unidade de volume, de se encontrar a partícula na vizinhança de um ponto do espaço e num determinado instante de tempo; por isso, seu significado físico é o de uma *densidade de probabilidade*. Foi o físico alemão Max Born (1882-1970) quem, em 1927, propôs essa interpretação para o módulo ao quadrado da função de onda, razão por que ganhou o prêmio Nobel em 1954.

No caso muito simples de um sistema quântico formado por uma única partícula microscópica, a função de onda depende do parâmetro t e da posição espacial da partícula, ou seja, de suas três coordenadas espaciais. Contudo, no caso de sistemas quânticos mais complexos, ela deverá ser função de vários observáveis físicos, não apenas da posição de uma

só partícula. Entretanto, como comentamos antes, nem todos os observáveis são compatíveis para um dado sistema quântico. Isso significa que, como argumentos da função de onda, só podem comparecer observáveis compatíveis entre si. Portanto, para conhecer a Ψ e o estado quântico de um sistema é necessário determinar um conjunto mínimo de observáveis *compatíveis* associados ao sistema.

Com sua interpretação, Born conseguiu relacionar a função de onda Ψ com a probabilidade de localização dos objetos microscópicos. Isso significa que as soluções da equação de Schrödinger não fornecem trajetórias nem descrevem a propagação de algo material (como é o caso das funções de onda que descrevem a propagação de ondas sonoras, ondas mecânicas em geral ou ondas eletromagnéticas), mas somente probabilidades de localização das partículas! (Por meio de seu módulo ao quadrado.) Essa interpretação causou grande desconforto na época, traduzindo-se num problema conceitual e filosófico, pois, dessa maneira, no mundo atômico o determinismo deveria ser abandonado!

Para compreendermos o sentido do determinismo na física clássica e, então, podermos compará-lo com a descrição probabilística, devemos salientar que, na descrição determinista, se conhecermos as *condições iniciais* do movimento de uma partícula macroscópica (ou seja, sua posição inicial e sua velocidade, ou *momentum* linear, inicial), poderemos determinar, a partir das leis de Newton, a descrição do movimento em termos da posição e da velocidade (ou *momentum* linear) em *qualquer* instante. Em outras palavras, conhecendo o “presente” (condições iniciais), poderemos determinar (daí o termo “determinismo”) o “futuro”. Na mecânica quântica isso não é verdadeiro.

De acordo com tal interpretação, a equação de onda de Schrödinger constitui, portanto, um *modelo estatístico*, incapaz de nos fornecer o valor que uma grandeza específica terá num instante específico, ou seja, o modelo quântico é capaz de nos fornecer a probabilidade de cada valor esperado vir a ser observado naquele determinado instante.

O fato de a teoria quântica não fornecer um valor específico, mas apenas relacionar possíveis valores e a probabilidade de ocorrência de cada um, resultou num famoso (e muito respeitoso) “duelo” intelectual entre Einstein e Bohr (Figura 22).



Figura 22 – Einstein e Bohr

Voltando às nossas atividades virtuais e às conclusões a que chegamos, quando as partículas usadas são microscópicas: como podemos verificar a existência da função de onda a partir dos padrões visualizados? Como podemos interpretar o caráter estatístico ou probabilístico nesses padrões?

No experimento de Young da fenda dupla, vimos que uma frente de onda luminosa divide-se ao passar pelas duas fendas. Cada nova frente de onda assim produzida propaga-se, a partir de cada fenda até a tela e, nesta, superpõem-se, interferindo entre si. Quando o experimento de Young é refeito com partículas microscópicas, o que acontece? Podemos dizer que as partículas microscópicas, ao chegarem à fenda dupla, dividem-se? O que faz com que uma partícula microscópica possa interferir consigo mesma?

Da mesma forma que uma onda luminosa divide-se em duas na dupla fenda, são as funções de onda associadas a partículas microscópicas que incidem na dupla fenda (mesmo sendo uma de cada vez!) que se dividem (não as partículas!), propagando-se depois disso até a tela, onde irão se superpor e interferir. O módulo ao quadrado da função de onda resultante na tela representa a densidade de probabilidade de encontrar uma partícula microscópica do feixe atingindo a tela num dado ponto e num dado instante. Os lugares mais prováveis de a partícula microscópica atingir a tela são aqueles onde é maior o valor do módulo ao quadrado de sua função de onda (franjas claras) e os lugares menos prováveis de encontrar uma partícula microscópica são aqueles onde são menores os valores do módulo ao quadrado da função de onda (franjas escuras), ou seja, não podemos dizer exatamente onde uma partícula microscópica está ou estará, mas, quando temos um número muito grande de partículas, podemos dizer, com muita precisão, o lugar mais provável de onde elas poderão ser encontradas; também, podemos dizer com certeza o lugar onde as partículas *não estarão* – ou seja, onde a probabilidade é zero.

Como vimos na experiência de Young para partículas microscópicas, o padrão de impactos observado é um padrão característico de interferência, o qual deriva do princípio da superposição linear. Este princípio se refere aos possíveis estados de um sistema quântico. Se dois estados quânticos são possíveis, então também é possível existir a soma dos dois estados, ou seja, um terceiro estado, que é a combinação dos dois primeiros. Isso significa que um objeto quântico pode existir simultaneamente em *mais de um estado*, ao contrário do que é assumido como válido na física clássica. Conseqüentemente, a *superposição de estados* leva a uma *teoria probabilística*.

Essa é uma das conseqüências da descoberta de Born: o fato de a física quântica nos mostrar que a natureza pode ser descrita em termos de probabilidade e que a teoria possui, essencialmente, um caráter probabilístico ou estatístico, não determinístico.

9.3. APÊNDICE C - ROTEIRO PARA ATIVIDADE VIRTUAL - PARTE I

Experimento da fenda dupla

Instruções gerais: Suas observações, descrições, explicações, opiniões ou dúvidas devem ser anotadas na mesma ordem em que as diversas etapas vão sendo realizadas. Não serão aceitas atividades sem desenvolvimentos ou com respostas do tipo “não sei”. O resultado final deverá ser entregue à professora para avaliação.

I – Aprendendo a usar o simulador

- O *software* DoppelSpalt (Fenda Dupla) pode ser baixado livremente do endereço www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html.
- Depois de instalado (o que é muito fácil de fazer), o programa abrirá uma janela onde você deverá clicar na opção *ignorieren*. Então se abrirá a janela mostrada na Figura 1, onde aparecem figuras dos principais formuladores da mecânica quântica (quem são?). Você poderá saber o nome de cada um deles posicionando o *mouse* em cima da correspondente figura. Ainda nessa tela, escolha a língua que deseja usar e clique OK para entrar no programa (nesse roteiro a língua utilizada foi o Inglês).

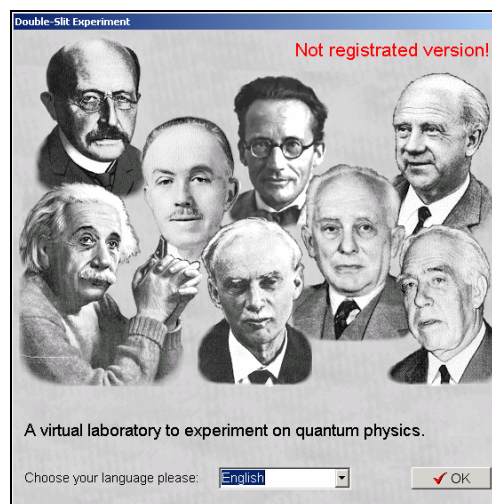


Figura 1 – Tela de abertura do *software*

- Em seguida, aparecerá a tela principal do *software* (Figura 2), onde você poderá clicar em cima dos botões virtuais para escolher a combinação de alternativas e de parâmetros que usará em sua simulação. A Figura 3 mostra os botões da tela principal ampliados.

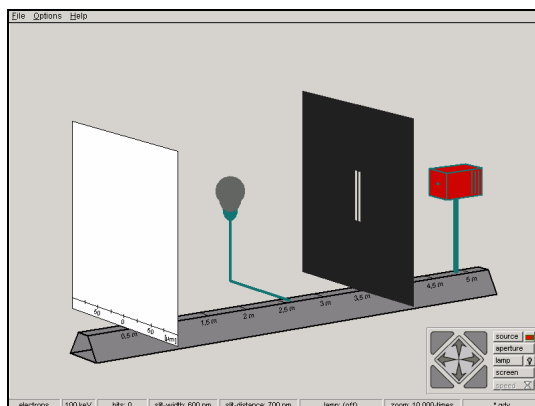


Figura 2 – Tela principal do *software*



Figura 3 – Botões da tela principal

- Clicando com o botão esquerdo do *mouse* em fonte, você poderá escolher qual o tipo de fonte de emissão que usará tais como, feixes de balas de metralhadora, de elétrons, de prótons, de átomos inteiros ou de moléculas inteiras e, também, de fótons – ou seja, luz (radiação eletromagnética, segundo a física clássica). A grande diferença entre os fótons e as outras partículas citadas é que estas são todas dotadas de massa, enquanto nenhum fóton possui massa.
- Clicando com o botão esquerdo do *mouse* em cima do anteparo da fenda dupla, poderá escolher a distância de separação entre os centros das mesmas e, também, qual será a largura de cada fenda.
- Clicando em cima da tela com o botão esquerdo do *mouse* você poderá “fotografar”, isto é, gravar os padrões obtidos com o simulador, e também obter gráficos e histogramas dos mesmos.
- Para iniciar/parar uma simulação, clique com o botão esquerdo do *mouse* no botão virtual da Figura 4.



Figura 4 – Botão iniciar

- Você pode aumentar a frequência de emissão da fonte – o que simula a passagem mais rápida do tempo – clicando no botão virtual da Figura 5.



Figura 5 – Utilizado para aumentar a frequência de emissão

- Você pode visualizar o arranjo do interferômetro sob diferentes ângulos de perspectiva clicando nas setas contidas no botão virtual (Figura 6). E ainda, clicando nos triângulos exteriores desse botão virtual, nos quatro cantos do quadrado que sua forma define, podem-se adotar quatro perspectivas radicalmente diferentes do arranjo de fenda dupla, cada qual tendo suas vantagens em relação aos demais, mas todos se complementando.



Figura 6 – Utilizado para visualização de diferentes ângulos

II - Atividades

Atividade 1

1-1. Clique em *source* (fonte) e escolha a opção *gunballs* (balas de metralhadora). Ligue a fonte e observe o padrão que vai se formando na tela. Para acelerar o transcorrer do tempo, aumente a frequência de emissão da fonte, clicando no botão *speed*. Quando um padrão bem definido e estável estiver disponível na tela, passe a descrever detalhadamente o mesmo, e anote suas observações. Tente se concentrar nos aspectos que, em sua opinião, são os mais relevantes e/ou característicos.

1-2. Feche uma das fendas clicando na opção *aperture* ou sobre o anteparo onde se encontram as fendas. Anote o que você observa na tela, usando um feixe de balas. Há alguma(s) diferença(s) em relação ao que você observou na etapa 1-1?

1-3. Feche a fenda que havia aberto antes e abra a que estava fechada. O que você observa agora? Houve alguma(s) mudança(s) significativa(s)? Registre suas observações sucintamente.

1-4. Abra novamente as duas fendas. Descreva detalhadamente o que você observa na tela e compare com o que observou nos itens anteriores. Verifique os gráficos correspondentes a esse padrão clicando em cima da tela e escolhendo as opções *theo result* (resultado teórico) e *evaluation* (avaliação). Faça um esboço desses gráficos em seu trabalho.

1-5. Que conclusão geral você tira a partir dessas comparações? Tente explicar (a descrição você já fez!) fisicamente o que se observa na tela.

1-6. No experimento virtual que você acabou de realizar, foi usado um feixe de balas de metralhadora, formado, portanto, por partículas clássicas. Quais são as características que você considera mais importantes de uma partícula que obedece às leis da física clássica?

1-7. Vamos comprovar o que você observou nos itens acima com um exemplo numérico. Considere que cada bala da metralhadora tem uma massa de 5mg e que sua velocidade seja de 100 m/s. Utilizando a relação de De Broglie $\lambda = h/p$ com $p = m \cdot v$ calcule o comprimento de onda para as balas e, depois de obter a resposta, verifique o porquê as balas não podem apresentar um padrão de difração.

Atividade 2

2-1. Clique em fonte e escolha a opção *colorspray* (*spray* colorido). Trata-se ou não de um feixe de partículas clássicas? O que você acha? Por quê?

2-2. Ligue a fonte com as duas fendas abertas e observe o padrão que vai se formando na tela. Descreva sucintamente suas características mais relevantes e compare-o com o padrão que foi observado na etapa 1-1 da Atividade 1.

2-3. Feche uma das fendas, clicando na opção *aperture* ou sobre o anteparo. Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo as opções *theo result* e/ou *evaluation*. Registre suas observações do padrão formado na tela, junto com esboços dos gráficos correspondentes ao padrão.

2-4. Em seguida, feche a fenda que havia aberto e abra a que estava fechada. Observe o padrão que surge na tela. Houve alguma alteração significativa em relação ao padrão anterior? Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*.

2-5. Depois abra novamente as duas, observe o padrão que se forma na tela e verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*. Anote sucintamente o que você observou na tela e compare com o que observou antes, com apenas uma das fendas aberta. Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*. Que conclusão geral você tira dessas comparações?

2-6. Nas atividades 1 e 2 você observou algum padrão parecido com o que se observa no experimento de Young feito com ondas? Ou seja, você observou algum padrão que seja típico de interferência? Justifique sua resposta. Por que não se observa padrões de interferência nas atividades 1 e 2, se a mecânica quântica descreve toda a matéria? (você pode usar o valor encontrado no item 1.7 para justificar sua resposta).

2-7. Calcule o comprimento de onda de De Broglie para um elétron na velocidade de 4 cm/s e para uma bolinha de aço de 2 g com a mesma velocidade. Imagine que se queira observar a difração e a interferência da bolinha e do elétron e que para isso vamos fazer com que vários deles passem por uma fenda de 1 cm, conseguiremos observar esses fenômenos em ambos os casos? Use a relação de De Broglie para justificar sua resposta

9.4. APÊNDICE D - ROTEIRO PARA ATIVIDADE VIRTUAL – PARTE II

Atividade 1

1-1. Clique em fonte e escolha a opção fótons, feche uma das fendas e escolha a largura mínima para a fenda que ficou aberta. Altere também o valor do *zoom* para 1000x. O *software* simula a emissão de um feixe luminoso monofotônico, ou seja, um feixe luminoso de intensidade tão fraca que apenas um fóton incide no anteparo da fenda dupla de cada vez (todos dotados de mesma energia, de maneira que o feixe também é monoenergético). Ligue a fonte e observe a chegada de cada fóton na tela. Observe os padrões formados, depois que um grande número de fótons já atingiu a tela, quando apenas uma das fendas fica aberta, e, depois, a outra (pode usar a opção *Speed* para aumentar a frequência de emissão dos fótons e simular o transcorrer mais rápido do tempo). Descreva o que você observou.

1-2. O padrão que você observa agora é o mesmo que aquele observado nas atividades em que trabalhamos com partículas macroscópicas, quando tínhamos apenas uma fenda aberta? Por quê? Em sua opinião, quais são as diferenças mais notáveis e relevantes?

1-3. Repita o experimento agora com as duas fendas abertas (com a mesma largura de antes). Se quiser poderá usar os diferentes *zoom* e clicar nas opções resultado teórico e avaliação. Procure descrever como acontece a chegada dos fótons no anteparo. E agora, o padrão que você observa é o mesmo que aquele observado nas atividades em que trabalhamos com partículas macroscópicas, quando também tínhamos as duas fendas abertas? Tente dar explicação para o que você observa na tela, tendo como base o que aprendeu sobre interferência de ondas.

1-4. A partir do que observa na tela, após um padrão bem definido ter surgido na mesma, de que maneira você identifica o comportamento corpuscular e o comportamento ondulatório dos fótons?

1-5. É comum ler-se que uma característica fundamental da mecânica quântica é a dualidade onda-partícula. Analise essa afirmativa com base no que você observou na atividade anterior.

1-6. Que conclusão geral você tira dessa atividade? Responda, comparando com a conclusão geral que você tirou das atividades realizadas com partículas macroscópicas.

Atividade 2

Os fenômenos da difração e da interferência não podem realmente ser separados de forma completa. Franjas de difração são originadas da interferência entre raios de luz provenientes de lugares diferentes de uma mesma fenda; franjas de interferência são originadas da interferência entre os raios luminosos provenientes de fendas diferentes. Quando duas fendas estão abertas, esses dois tipos de franjas ocorrem simultaneamente e não

podem ser separados de forma completa. Vamos confirmar essa afirmação nas próximas atividades com o *software*.

2-1. Escolha a opção elétrons e mantenha somente a fenda 1 aberta na largura de fenda 100nm e energia de cada elétron igual a 100KeV, o que corresponde (pela relação de De Broglie) a um comprimento de onda de 4pm ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$). para os elétrons do feixe. Quando estiver se formando um padrão na tela, pare e observe. Escreva o que você observou. Grave este padrão como a Foto 1, clicando no anteparo da tela e escolhendo a opção Cinta de Fotos (espanhol) ou *Photos* (inglês).

2.2. Agora abra as duas fendas e mantenha os mesmos valores do item anterior, verifique a distância entre os centros das fendas que deve ser 700nm. Clique no botão *reset* e inicie. O padrão que você observou é o mesmo que foi observado na atividade 2.1? Justifique sua resposta. Grave este padrão como a Foto 2 da cinta de fotos.

2.3. Agora mude apenas a distância entre os centros das fendas (clicando sobre o anteparo das mesmas), de 700 nm para 2000 nm. Quando a distância das fendas aumenta, o que acontece com o padrão de franjas observado? Grave este padrão como a Foto 3 da cinta de fotos.

2.4. Ainda com as duas fendas abertas e, com a largura das fendas 100nm diminua a distância entre as fendas para 100nm. O que acontece com o padrão apresentado na tela? Esse padrão não poderá ser gravado, mas ele ficará logo abaixo dos outros 3 que já estão gravados, então, compare o novo padrão de franjas obtido com aqueles das Fotos 1, 2 e 3.

2-5. Agora mantenha apenas a fenda 1 aberta, variando a largura da mesma para 600nm. Explique o padrão que você está visualizando na tela.

Atividade 3 - Exercício Interativo

3.1. Clicando em fonte, vamos escolher elétrons com energia de 1 kev e *zoom* 1000 x. Elétrons com esse valor de energia cinética têm velocidades não-relativísticas, de modo que seu *momentum* linear (quantidade de movimento) é dado pela definição newtoniana, ou seja, $p = m.v$. O *software* nos informa também que elétrons com essa energia têm comprimento de onda $\lambda = 39 \text{ pm}$. Tente obter este valor de comprimento de onda, considerando que se tratem de elétrons não-relativísticos. Ou seja, considere que o *momentum* linear de cada elétron é dada pela relação clássica, $p = m.v$ e que a energia cinética é dada pela relação $E = \frac{1}{2}m.v^2$.

Dados: a massa do elétron é $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

3-2. Vamos checar a validade da fórmula da condição de máximos de interferência ($d \cdot \sin \theta_n = n \cdot \lambda$, onde $n = 0, 1, 2, \dots$). Para isso, vamos usar os dados que o *software* nos fornece. Depois de decorrido algum tempo, pare a simulação que estava fazendo anteriormente e, anote os seguintes valores: D (distância entre a tela e o anteparo onde estão as fendas), d (distância entre os centros das fendas) e Y_n (distância do centro da tela ao n -ésimo máximo lateral; o máximo central corresponde a $n = 0$). Nossa sugestão é que seja usado o segundo máximo lateral, correspondente a $n = 2$. Para tal, use a escala do *software*. A Figura 1 ilustra o ângulo θ_2 . Como o ângulo usado é muito pequeno comparado a 1 radiano,

(que é equivalente a aproximadamente 57°), pode-se usar a seguinte aproximação: substituir o *seno* pela tangente de θ_n , obtendo:

$$d \cdot \text{sen } \theta_n \cong d \cdot \text{tg } \theta_n = n \cdot \lambda.$$

Além disso, da Figura 1, obtemos que $\text{tg } \theta_n = Y_n / D$. Em seguida, isole o valor de Y_n e compare com o valor correspondente determinado a partir da tela do *software*.

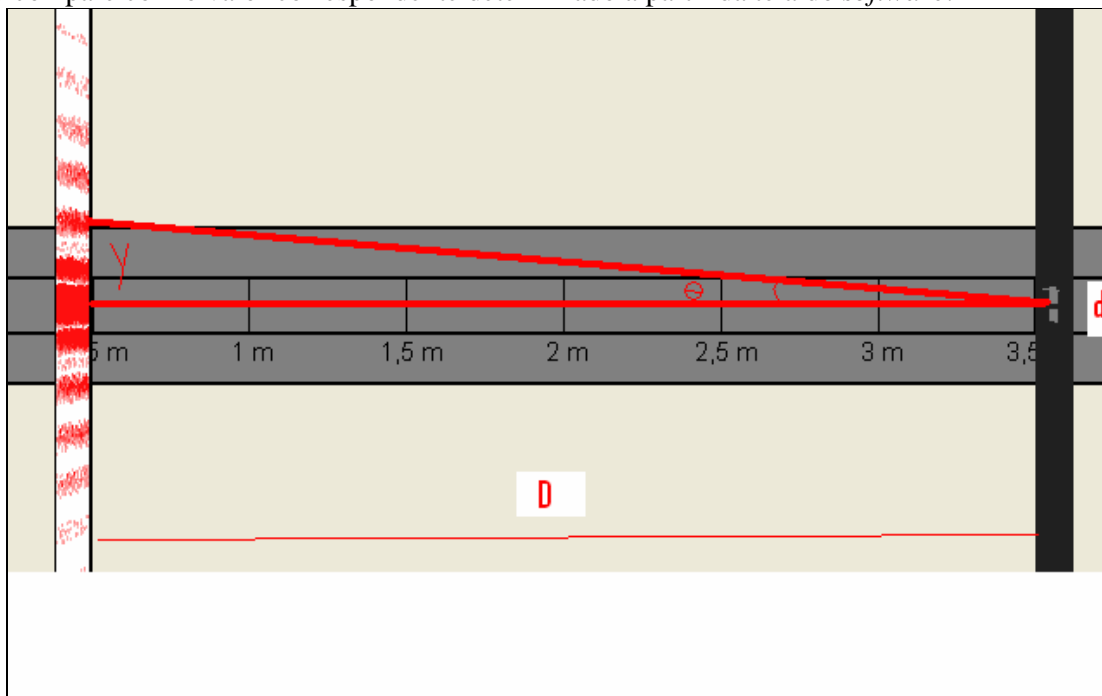


Figura 1 – Ilustra o ângulo θ_2 que localiza o segundo máximo lateral ($n = 2$). Note também que o suporte do arranjo do simulador possui uma escala facilmente utilizável pelo usuário.

Qual o valor encontrado para a distância do n -ésimo máximo lateral e o ponto central da tela (Y_n)? Compare esse valor com aquele que se pode ler na escala da tela virtual do *software*, basta clicar com o *mouse* direito em cima do segundo máximo.

Sugestão para parâmetros a serem usados no exercício interativo:

$$d = 700\text{nm} \quad D = 3\text{m} \quad n = 2 \quad \lambda = 39\text{pm}$$

3-3. Na atividade anterior, fizemos uma aproximação para os valores de seno, substituindo-os pelos das tangentes dos ângulos correspondentes. Temos como provar que esses valores são realmente muito próximos, e também como conferir se o ângulo θ realmente tem um valor bastante pequeno. Para isso, use os valores fornecidos pelo *software* e calcule primeiramente o valor de θ usando a condição de máximos de interferência. Em seguida, use a fórmula da tangente, determine o valor do θ e compare os dois resultados encontrados. Você saberia explicar, geometricamente, o porquê o valor de θ é tão pequeno?

9.5. APÊNDICE E - LISTA DE EXERCÍCIOS DE REVISÃO

1. Uma das características importantes de uma onda eletromagnética é a polarização. Em que consiste a polarização da luz?
2. Explique sucintamente o fenômeno da difração de ondas, considerando que a fenda ou a fonte de luz não seja puntiforme.
3. Baseando-se na relação de De Broglie, explique por que não observamos as características de difração (um padrão de franjas claras escuras) com feixes de balas de metralhadora, cada qual com 10 mg de massa e velocidade de 100m/s?
4. A interferência luminosa representa uma constatação de que a luz possui características típicas de um fenômeno ondulatório. Baseado nessa afirmação, explique o fenômeno da interferência.
5. Faça um esboço dos padrões gráficos de interferência e de difração e explique a(s) diferença(s) entre um padrão de franjas de difração e um de franjas de interferência.
6. Não podemos visualizar átomos através de fotografias obtidas com a luz. Por quê? De que forma, então, são obtidas as imagens de átomos que vemos reproduzidas em muitos livros?
7. Em sua opinião, quais as diferenças mais relevantes entre objetos clássicos e objetos quânticos? Dê exemplos que justifiquem sua resposta
8. A Energia de um átomo não pode assumir qualquer valor. Essa afirmação está intimamente ligada ao fato de que a energia, no caso de um sistema ligado, não é contínua, mas sim, quantizada. Explique o que significa dizer que a energia é quantizada, citando também alguns exemplos de grandezas quantizadas.
9. Na questão anterior você explicou o significado do termo “quantizada” aplicado à energia de um átomo. O que significa esse termo quando aplicado à luz? Justifique sua resposta usando o modelo proposto por Einstein para a luz.
10. Em que consistia o problema do espectro de emissão do corpo negro? Qual foi a hipótese de Planck para resolver o problema?
11. Einstein usou a hipótese de Planck para explicar convincentemente o efeito fotoelétrico. Esse efeito comprovava conclusivamente que tipo de comportamento por parte da luz?
12. Na famosa experiência de Young da fenda dupla, a fonte utilizada emitia luz (aproximadamente) monocromática. Por quê? Qual a conclusão a que Young chegou depois de realizar o experimento?

13. A experiência de Young da fenda dupla foi virtualmente refeita em sala de aula, usando-se como fonte um feixe de elétrons mono energéticos. A conclusão obtida da experiência foi a mesma que Young obteve?
14. Uma característica fundamental da mecânica quântica é a chamada dualidade onda-partícula. Analise essa noção através do que você concluiu no exercício anterior.
15. A luz se propaga de um lugar para outro como uma onda ou como uma partícula?
16. A luz interage com um detector qualquer (tela, sensor luminoso, célula fotoelétrica, célula da retina etc.) como se fosse uma onda ou uma partícula?
17. Em sua opinião, quais são as diferenças mais relevantes entre física clássica e física quântica?
18. As Leis da mecânica clássica são válidas para todos os corpos, sejam eles microscópicos ou macroscópicos? Explique sua resposta, citando exemplos.
19. A analogia entre os elétrons de um átomo e os planetas do sistema solar é muito imperfeita. Cite pelo menos uma razão para justificar essa afirmação.
20. O que é um fóton? Qual sua massa? Qual a sua velocidade de propagação no vácuo?
21. O que é o *spin* de um elétron? Tente explicar com suas próprias palavras do que se trata.
22. Qual a diferença mais relevante entre elétrons e fótons?

9.6. APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 1 – Comparação entre pré - teste e pós-teste

ALUNO	X	Y	G = Y- X	G²
1	2,0	9,0	7,0	49,00
2	4,5	10,0	5,5	30,25
3	5,0	12,5	7,5	56,25
4	5,5	10,0	4,5	20,25
5	2,0	11,5	9,5	90,25
6	1,0	9,0	8,0	64,00
7	2,0	4,0	2,0	4,00
8	2,0	11,0	9,0	81,00
9	1,0	9,0	8,0	64,00
10	3,0	13,0	10,0	100,00
11	3,0	10,0	7,0	49,00
12	4,0	7,5	3,5	12,25
13	2,0	7,0	5,0	25,00
14	2,0	8,5	6,5	42,25
15	4,0	10,5	6,5	42,25
16	3,0	8,5	5,5	30,25
$\Sigma =$			105,0	760,0

Observações:

- Foram eliminados da tabela os alunos que não compareceram no pré-teste;
- X = escores no pré-teste;
- Y = escores no pós-teste;
- G = variável ganho;
- n = número de alunos;
- t = razão t de Student

Procedimentos:

- $\bar{G} = \frac{\Sigma G}{N} = 6,5625$
- $S_{\bar{G}} = \sqrt{\frac{\frac{\Sigma G^2}{n} - \bar{G}^2}{n-1}} = 0,5436$
- $t = \frac{\bar{G}}{S_{\bar{G}}} = 12,07$

Utilizando-se da tabela de valores críticos da razão t student²⁰, constatou-se que o nível de significância estatística associado a $t = 12,07$ é inferior a 0,01, pois nesse nível a tabela apresenta para o número de graus de liberdade g.l.= 15, $t = 2,70$. Então, concluímos que a probabilidade de que a diferença média entre o pós-teste e o pré-teste tenha ocorrido por

²⁰ A tabela de valores críticos de t student e o procedimento realizado nessa análise encontram-se disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~lang/Comparacoes_em_media.pdf

acaso é menor que 1 %, portanto, muito pequena. Acreditamos que houve um crescimento desse grupo de alunos nos seus escores no pré-teste e pós-testes.