
CONCEITOS DE FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES: RELATO DE UMA EXPERIÊNCIA DIDÁTICA CENTRADA NO USO DE EXPERIMENTOS VIRTUAIS⁺*

*Fernanda Ostermann
Trieste F. Ricci
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS*

Resumo

Neste trabalho, relatamos a reestruturação e implementação de uma unidade didática conceitual sobre Física Quântica (FQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” da segunda turma do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MPEF-UFRGS). O foco do artigo é a descrição da nova versão da unidade conceitual, complementada por alguns resultados qualitativos obtidos com a re-aplicação de um instrumento previamente construído para realizar levantamento de noções básicas sobre o tema. O desenvolvimento da unidade está centrado no uso de novas tecnologias para o aprendizado significativo de conceitos centrais da FQ. Dois softwares livres, do tipo “bancada virtual”, foram usados como recursos didáticos articulados a roteiros exploratórios especialmente elaborados. Com o desenvolvimento da unidade conceitual, centrada no uso dos softwares mencionados, foi possível promover mudanças nas concepções dos alunos-professores, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

Palavras-chave: *Formação de professores, novas tecnologias no ensino, Física Quântica.*

Abstract

⁺ *Quantum mechanics concepts in teacher’s preparation: A narrative of a didactical experience centered in the use of virtual experiments*

^{*} *Recebido: outubro de 2004.
Aceito: abril de 2005.*

In this work, we present a new formulation of a conceptual Quantum Mechanics (QM) unit. The implementation of this unit took place in the “Modern and Contemporary Physics Topics I” course, which is part of the graduate curriculum designed for preparing Masters in Physics Teaching Education at the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil. The aim of this article is to describe this new formulation and the qualitative results obtained through a reapplication of a questionnaire previously constructed about QM basic conceptions. The unit is centered in the use of new technologies to promote meaningful learning about QM central concepts. Two softwares (“free”) concerning virtual experiments were used as didactical resources together with an especially elaborated tutorial. After the implementation of the conceptual QM unit, centered in the use of the mentioned softwares, it was possible to observe changes in the teachers – students conceptions, especially those involved with the distinction between classical and quantum objects.

Keywords: *Teacher’s preparation, new technologies in teaching, Quantum Mechanics.*

I. Introdução

Este artigo tem por objetivo relatar como a concepção de uma unidade didática conceitual sobre Física Quântica (FQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” (TFMC1) foi evoluindo, a partir de uma primeira implementação da unidade, durante o segundo semestre de 2002 (OSTERMANN; RICCI, 2003a). A experiência envolveu alunos-professores de ensino médio, em exercício, da primeira turma (19 alunos) do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física (MPEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Após essa primeira implementação, a unidade conceitual passou por uma reestruturação baseada nas observações dos dois professores envolvidos no curso e nas observações, sugestões e críticas apresentadas pelos alunos no decorrer do mesmo.

Na primeira elaboração da unidade (OSTERMANN; RICCI, 2004), a motivação estava centrada na necessidade de preparar um curso introdutório à FQ que rompesse com a abordagem tradicional geralmente adotada nos cursos ministrados na graduação e na pós-graduação. Nessa abordagem, por exemplo, há freqüentemente uma ênfase no emprego do formalismo matemático como mera ferramenta - principalmente em cursos de graduação – e na resolução de extensas listas de problemas, com o que se busca desenvolver no aluno um domínio dos aspectos operatórios da Mecânica

Quântica. Em cursos introdutórios menos formalistas, comuns ao longo da formação de professores de Física de ensino médio, por exemplo, costuma-se encontrar abordagens semiclássicas nas quais a Mecânica Quântica é introduzida de maneira fortemente correlacionada com a Mecânica Clássica, seja em seus fundamentos e pressupostos mais básicos, seja em sua evolução histórica. Esse tipo de abordagem acaba relegando a um segundo plano questões cruciais, como a de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos.

O trabalho teve início com uma revisão da literatura recente, envolvendo artigos que discutem tanto questões de ensino relacionadas ao tema, como instrumentos construídos para a detecção de concepções de alunos e professores de Física sobre a FQ (Ostermann e Ricci, 2003a). De modo geral, essa revisão mostrou que existe uma grande carência de discussões acerca dos aspectos conceituais e, até, filosóficos da Mecânica Quântica, tanto em cursos de graduação como de pós-graduação. Para usar uma expressão coloquial, muitas vezes os professores de Mecânica Quântica “se escondem atrás da matemática”, evitando abordar os aspectos conceituais. O que importa é demonstrar resultados matemáticos e obter excelência no uso das regras matemático-operatórias da Mecânica Quântica. Entretanto, o domínio de aspectos conceituais da Mecânica Quântica vem se mostrando uma condição fundamental para que se possa atacar novas questões e problemas teóricos no âmbito da pesquisa básica em áreas de fronteira da Física (computação quântica ou cosmologia, por exemplo). No contexto escolar, este domínio é crucial na competência do professor em transpor o conteúdo para seus alunos.

Outra conclusão a que chegamos é que são escassas também as propostas de introdução de FQ no ensino médio e na formação de professores, e não apenas no Brasil ou na América Latina. Também foi possível concluir que existe um número pequeno de pesquisas sobre concepções de alunos e professores em FQ, o que justifica a estruturação de uma unidade didática conceitual sobre FQ descrita na próxima seção.

Dada a natureza do Mestrado Profissionalizante - cujo objetivo é melhorar a qualificação profissional de professores de Física do nível médio através do desenvolvimento, pelo próprio mestrando, de um produto educacional que possa promover mudanças na sua prática docente – tornava-se necessário que a disciplina TFMC1 fosse ministrada em moldes diferentes do tradicional, buscando promover a compreensão aprofundada dos conceitos e das noções básicas da FQ sem uma preocupação excessiva com o formalismo matemático ou com a evolução histórica da área. No entanto, apesar dessa preocupação ter estado presente, de forma racional, durante a primeira elaboração da unidade conceitual, uma avaliação a posteriori permitiu verificar que a mesma ainda precisava passar por um considerável “enxugamento”, visando um menor dispêndio de tempo com tópicos mais tradicionais, em função de um maior investimento na discussão dos conceitos mais fundamentais da FQ e na exploração desses conceitos nas atividades envolvendo os softwares. Ou seja,

acabamos por reconhecer que, na elaboração da unidade conceitual, ainda estávamos, em alguns aspectos, muito “presos” à abordagem tradicional que, justamente, queríamos evitar.

Esse trabalho prosseguiu com uma segunda implementação da unidade, envolvendo uma outra turma (21 alunos) do mesmo programa, durante o segundo semestre de 2003. O foco desse artigo é a descrição da nova versão da unidade conceitual, complementada com as respostas dos alunos ao questionário de avaliação das noções básicas de FQ (OSTERMANN; RICCI, 2003b).

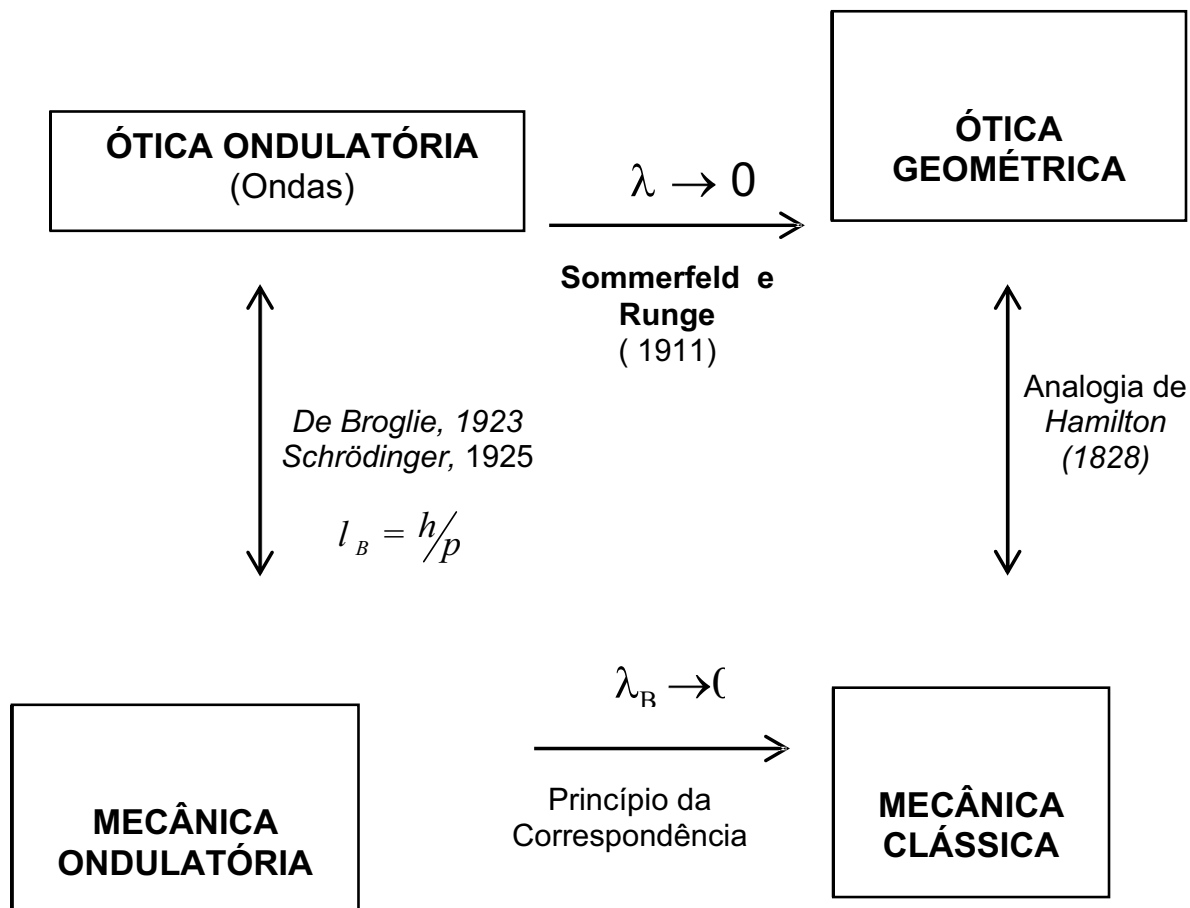
II. Descrição da unidade didática conceitual

A disciplina foi desenvolvida em um total de 18 encontros matinais (três horas-aula por manhã efetivamente), em semestre letivo normal, e estruturada em três unidades: primeiro uma *unidade conceitual* (objeto de interesse deste artigo), uma segunda *unidade formal* e uma terceira, a *unidade de aplicações*. A unidade conceitual foi ministrada ao longo de quatro encontros de uma manhã inteira pelos autores deste artigo.

Em primeiro lugar, tratou-se de retirar da unidade todos os tópicos de importância histórica secundária que ainda haviam sido abordados na primeira implementação da unidade conceitual. Outros tópicos de caráter histórico, muito relevantes também de um ponto de vista conceitual, foram mantidos. Sua abordagem, entretanto, foi realizada sem o uso de qualquer formalismo matemático, apenas de uma forma qualitativa, realçando aspectos conceituais como as profundas diferenças entre os objetos clássicos e os quânticos, e as analogias com a Ótica Ondulatória. O efeito fotoelétrico, o experimento de Compton sobre espalhamento de fótons, os resultados experimentais de difração e de interferência em experimentos com feixes de partículas (objetos quânticos), são exemplos desse tipo de tópico de caráter histórico a que nos referimos. No caso dos dois primeiros exemplos citados, o que se manteve foi a idéia central de que os fótons são objetos quânticos (sem massa) que, nesses experimentos manifestam, efetivamente, um comportamento corpuscular não previsto pela Física Clássica. No caso dos experimentos com elétrons, tratava-se de realçar o comportamento tipicamente ondulatório dos objetos quânticos revelados nos experimentos abordados.

Manteve-se a estratégia de abordar os fótons e os elétrons, desde o início, como protótipos de objetos quânticos elementares, bem como a de explicitar as diferenças fundamentais entre os objetos clássicos e os quânticos. A Ótica Ondulatória seguiu sendo uma espécie de “porta de entrada” para o mundo quântico através da abordagem de analogias entre situações da Ótica e da Mecânica Quântica, e também da exploração de semelhanças formais entre as duas teorias. O papel destacado da Ótica

Ondulatória na concepção da unidade conceitual, como “pano de fundo” clássico para a abordagem da Mecânica Quântica, está baseado na própria formulação histórica da Mecânica Ondulatória por Schrödinger em 1925-26 (DUGAS 1955; KÖBERLE 1979; KRAGH 1982; MOORE 1989; WICK, 1995), como sintetizado no quadro abaixo.



Quadro geral de analogias usadas por Schrödinger

O quadro sintetiza o que Erwin Schrödinger (1887-1961) buscava no final de 1925, e os elementos que ele dispunha para nortear sua pesquisa a partir do trabalho seminal de Louis de Broglie (1892-1987): basicamente, uma nova teoria matemática que descrevesse o comportamento de objetos materiais elementares e que, ao mesmo tempo, incorporasse analogias com a Ótica Ondulatória. No quadro acima, isto é representado pela seta vertical da esquerda. Vale observar sempre que, por essa época, não havia qualquer evidência experimental de que partículas materiais apresentassem comportamento ondulatório (o que só viria a acontecer dois anos mais tarde). Schrödinger apenas fora estimulado pelo trabalho teórico de De Broglie, que especulara sobre um possível caráter ondulatório que partículas elementares materiais, tais como

elétrons, poderiam revelar sob condições adequadas. Tratava-se para ele, portanto, de um programa *teórico* que deveria resultar em uma nova *dinâmica* para os objetos microscópicos.

De certa forma, havia um paralelo entre o programa que Schrödinger se propunha a desenvolver e o que Hamilton havia realizado no século XIX referente à Mecânica Clássica. Isso é ilustrado no quadro de analogias pela seta vertical da direita. William Hamilton (1805-1865) havia demonstrado, em 1828, que era possível formular a teoria da mecânica de partículas (objetos clássicos) de maneira que incorporasse uma grande analogia com a Ótica Geométrica. A trajetória descrita por uma partícula, por exemplo, aparecia na teoria de Hamilton como sendo sempre perpendicular, em cada ponto, a um conjunto de superfícies de “ação constante”. Isso lembra os “raios luminosos” da Ótica Geométrica (“trajetórias” da luz) que são perpendiculares às superfícies de “fase constante” de Christian Huyghens (1629-1697).

Por outro lado, em 1911, A. Sommerfeld (1868-1951) e J. Runge (1856-1927) haviam demonstrado detalhadamente que a Ótica Ondulatória, como descrita pelas equações de Maxwell, reduzia-se à Ótica Geométrica no limite em que o comprimento de onda tende a zero. Este limite está indicado no quadro de analogias acima pela seta horizontal superior. Ele significa que a descrição fornecida pela Ótica Geométrica é o limite de uma descrição mais geral dos fenômenos óticos, dada pela Ótica Ondulatória.

Para Schrödinger, havia um limite análogo para os fenômenos mecânicos, válido para partículas materiais macroscópicas, no qual a descrição fornecida pela Mecânica Clássica poderia ser derivada de uma teoria mais geral da Mecânica, ainda desconhecida. Influenciado pelo trabalho de De Broglie, Schrödinger (MOORE, 1989; SCHRÖDINGER, 1926; MEDICUS, 1974; WHEATON, 1984; KRAGH, 1982) identificou tal limite no chamado Princípio da Correspondência, proposto por Niels Bohr (1885-1962) em 1923. Este limite está representado, no quadro de analogias, pela seta horizontal inferior.

Deve ser notado que a estratégia baseada no quadro de analogias descrito acima representa um rompimento significativo com a abordagem tradicional, uma vez que esta segue rigorosamente a cronologia histórica da FQ, começando com a “velha teoria quântica”, para então, ensinar a “nova” teoria quântica, geralmente em sua versão ondulatória. Ou seja, na abordagem tradicional costuma-se explorar modelos diretamente inspirados na Mecânica Clássica de partículas para depois introduzir um modelo eminentemente ondulatório (Mecânica Ondulatória). Na concepção da unidade conceitual, preferimos explorar, desde o início do aprendizado, as analogias *naturais* entre a Ótica Ondulatória clássica e a Mecânica Ondulatória de Schrödinger, sem passar pela “velha teoria quântica”. Assumimos explicitamente a interpretação de Copenhague, alertando para a existência de outras interpretações.

Neste sentido, realizou-se também uma revisão de alguns aspectos fundamentais do Eletromagnetismo, porém reduzindo-se ao mínimo o emprego de formalismo matemático. Com todo esse “enxugamento” promovido, ganhou-se mais tempo para ser usado em atividades virtuais ou discussões com os alunos.

As atividades computacionais, como na primeira implementação da unidade, envolveram a utilização de dois *softwares* livres do tipo “bancada virtual”, que permitem a simulação de dois experimentos cruciais da FQ (MULLER; WIESNER, 2002). Esses *softwares* podem ser obtidos em:

www.physik.uni-muenchen.de/didatik/Computer.

O primeiro deles simula o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder, e o outro simula a experiência da fenda dupla realizada com feixes de elétrons. O *software* do interferômetro permite que se opere virtualmente com laser (regime clássico) e fótons individuais (regime quântico) explorando os aspectos corpuscular e ondulatório revelados no arranjo experimental, através da introdução de detectores de fótons ou de filtros polaróides nos braços do aparelho. O *software* da fenda dupla (que, para Richard Feynman, representava “o” experimento revelador do caráter quântico dos objetos microscópicos) permite que se opere com objetos clássicos e quânticos diversos, comparando os padrões obtidos na tela para cada caso. No caso de objetos quânticos, como elétrons, por exemplo, pode-se introduzir no arranjo experimental uma lâmpada e assim “descobrir” por qual das fendas o objeto passou, destruindo os efeitos de interferência para os elétrons que foram efetivamente detectados. Em virtude do tempo disponível obtido com o “enxugamento” da unidade, em sua segunda implementação pôde-se realizar cada uma dessas atividades durante uma manhã inteira, o que permitiu que os alunos explorassem com maior profundidade as possibilidades oferecidas pelos *softwares*.

A fim de que esses recursos cumprissem seu papel de promover a aprendizagem significativa, foram usados dois roteiros exploratórios elaborados pelos autores (ver Apêndice 1). Esses roteiros acabaram revelando-se uma estratégia adequada de utilização didática das novas tecnologias. Com frequência, observa-se a tendência de utilização das novas tecnologias de uma maneira superficial e simplista, em que a grande preocupação é a de apresentar ingenuamente o *software* como um mero brinquedo ou curiosidade, sem explorar efetivamente os conceitos da Física que estão por trás do mesmo. Essa postura pode, inclusive, criar no aluno a falsa impressão de que ele aprendeu muito com a atividade, mesmo que isso não seja necessariamente verdadeiro. Nesse sentido, o roteiro exploratório constituiu um passo adiante em relação a essa postura.

Com relação à simulação de experimentos de Física por meios computacionais, sempre cabe a questão: Por que usar as novas tecnologias quando, certamente, seria muito mais excitante para o aluno poder realizar experimentos REAIS

de Mecânica Quântica, e não virtuais? A justificativa para tal, no caso deste trabalho, deve-se à própria natureza dos experimentos abordados por meio dos *softwares*. No caso do interferômetro de Mach-Zehnder, trata-se de um arranjo experimental muito sofisticado e difícil de reproduzir em laboratórios de ensino, além do que o regime monofotônico do feixe luminoso utilizado só foi implementado em meados da década de 1980, em laboratórios de Física avançados, sendo praticamente impossível, por ora e pelos próximos anos, sua reprodução em laboratórios de ensino. No caso do experimento da fenda dupla com feixe de elétrons, somente na década de 1960 é que foram realizados experimentos utilizando realmente uma fenda dupla. Embora se possa obter efeitos de interferência com feixes de elétrons incidindo em estruturas cristalinas, ainda assim trata-se de um arranjo experimental de difícil implementação para fins meramente didáticos.

Também foram discutidos, de forma tradicional (“giz e quadro-negro”), alguns experimentos de pensamento. Um deles, por exemplo, foi o experimento da fenda dupla com feixes de elétrons, realizado dentro de uma câmara de neblina (WICK, 1995), como uma aplicação do princípio da incerteza de Heisenberg. Pôde-se comprovar a grande utilidade dos experimentos de pensamento discutidos dessa forma na compreensão e assimilação dos conceitos abordados na unidade conceitual.

Os alunos também realizaram uma atividade de leitura extraclasse dos oito primeiros capítulos do livro “Alice no país do quantum” (GILMORE, 1998), que são, realmente, os capítulos onde diversos conceitos de FQ são abordados. Em particular, o terceiro capítulo do livro aborda a experiência da fenda dupla realizada com feixes de elétrons, a mesma que é simulada com um dos *softwares*. Essa atividade foi articulada ao curso através de uma discussão realizada em sala de aula, a partir de um roteiro de questões sobre passagens da obra citada, elaborado pelos autores (ver Apêndice 2).

Para facilitar o acompanhamento do conteúdo exposto nas aulas, foi disponibilizado aos alunos um texto de apoio (RICCI; OSTERMANN 2003), que se mostrou muito útil para os alunos uma vez que não existe bibliografia disponível nos moldes da unidade conceitual aqui descrita. Nesse texto, além da abordagem de todos os tópicos discutidos em sala de aula, alguns experimentos historicamente cruciais da FQ (efeito fotoelétrico, experimento de Compton, experimento de Davisson-Germer, experimento de G. P. Thomson) são tratados mais detalhadamente. O mesmo ocorreu com os tópicos abordados na revisão do Eletromagnetismo realizada em sala de aula.

A implementação da unidade conceitual envolveu quatro manhãs inteiras (de um total de 18 da disciplina), mais uma meia manhã usada para uma avaliação, e mais meia manhã para uma recuperação. Ao final do processo de reestruturação realizado, a estrutura da unidade conceitual ficou assim:

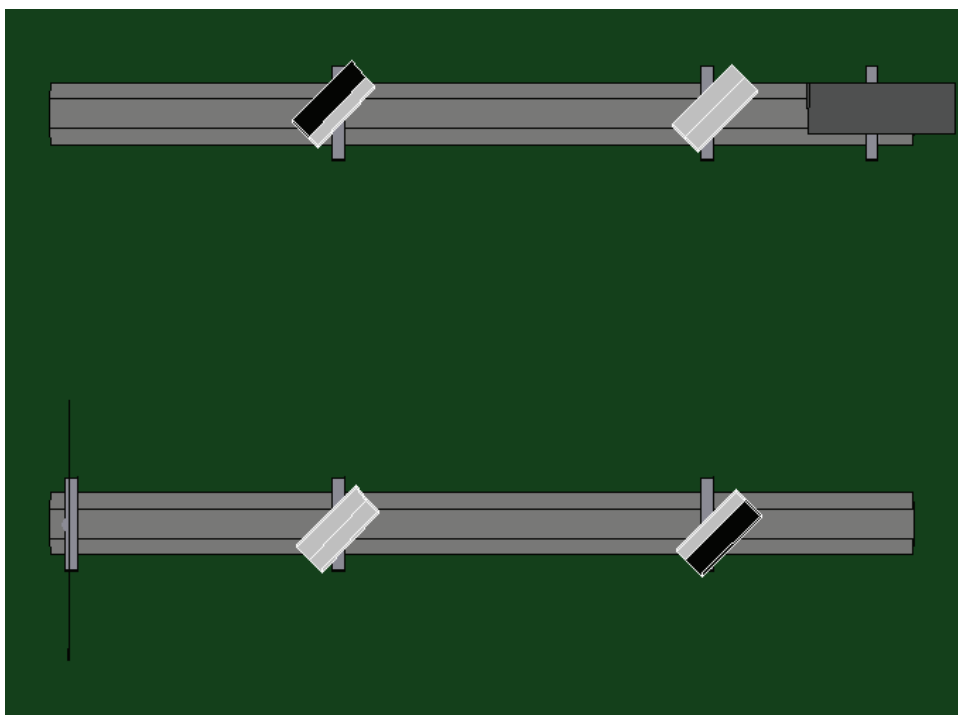
Primeira Manhã - Revisão de Ótica Ondulatória: Foram discutidos os conteúdos de difração, superposição e interferência da luz, o experimento de Young, a luz como uma onda eletromagnética, intensidade luminosa, polarização e a lei de Malus.

Segunda Manhã - Conceitos fundamentais da FQ: Sem qualquer formalismo matemático, foram abordados tópicos tais como a versão de Schrödinger da Mecânica Quântica (a Mecânica Ondulatória); discussão sobre a essência da teoria de Schrödinger; as características de objetos clássicos e quânticos; observáveis, descontinuidades quânticas e valores discretos de quantidades físicas; o caráter probabilístico da Mecânica Ondulatória e a doutrina de Copenhague; estado quântico, princípio da incerteza de Heisenberg e a questão do observador em Mecânica Quântica; os conceitos de onda e partícula na Física Clássica e a dualidade onda-partícula na Mecânica Quântica; Princípio da Incerteza *versus* dualidade onda-partícula: como estão relacionados; o interferômetro de Mach-Zehnder (M-Z): regime clássico e regime quântico; definição de estado e auto-estado a partir do estudo do interferômetro de M-Z; preparação de estados na Mecânica Quântica; o princípio da superposição Linear de Estados e aplicação ao interferômetro de M-Z; o postulado de Von Neumann e colapso da função de onda no interferômetro. Todos esses tópicos foram retomados na unidade formal do curso (envolvendo 7 manhãs inteiras da disciplina).

Terceira Manhã - Primeira Atividade Virtual: Os alunos trabalharam em duplas, durante toda a manhã, com o *software* do interferômetro de M-Z, orientados pelo roteiro exploratório correspondente (ver Apêndice 1). A última ½ hora da manhã foi dedicada à discussão dos quatro primeiros capítulos do “Alice” (ver Apêndice 2). As Fig. 1A e 1B ilustram o *layout* do *software* usado.

Quarta Manhã – Segunda Atividade Virtual: Os alunos trabalharam em duplas, durante toda a manhã, com o *software* do experimento da fenda dupla com feixe de partículas, orientados pelo roteiro exploratório correspondente (ver Apêndice 1). A última ½ hora foi dedicada à discussão dos capítulos de 5 a 8 do “Alice” (ver Apêndice 2). A Fig. 2 ilustra o *layout* do *software* usado.

Quinta Manhã: Avaliação do módulo conceitual, realizada em duas horas completas (ver Apêndice 3).



*Fig. 1A - Layout do software do interferômetro de Mach-Zehnder.
(vista superior)*

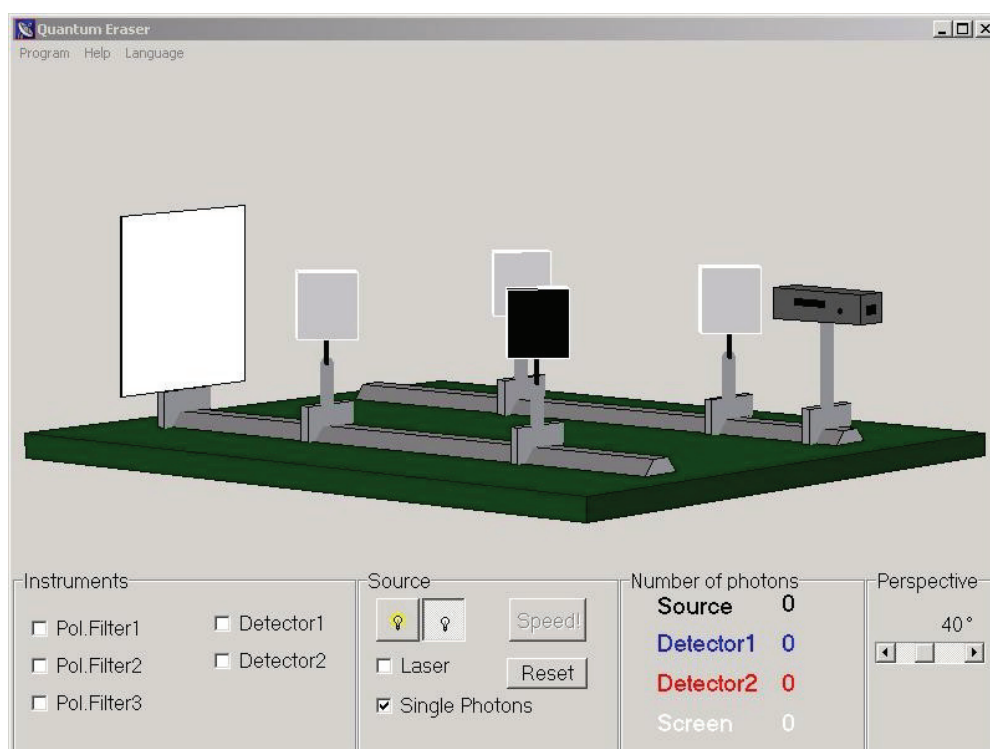


Fig. 1B - Layout do software do interferômetro de Mach-Zehnder.

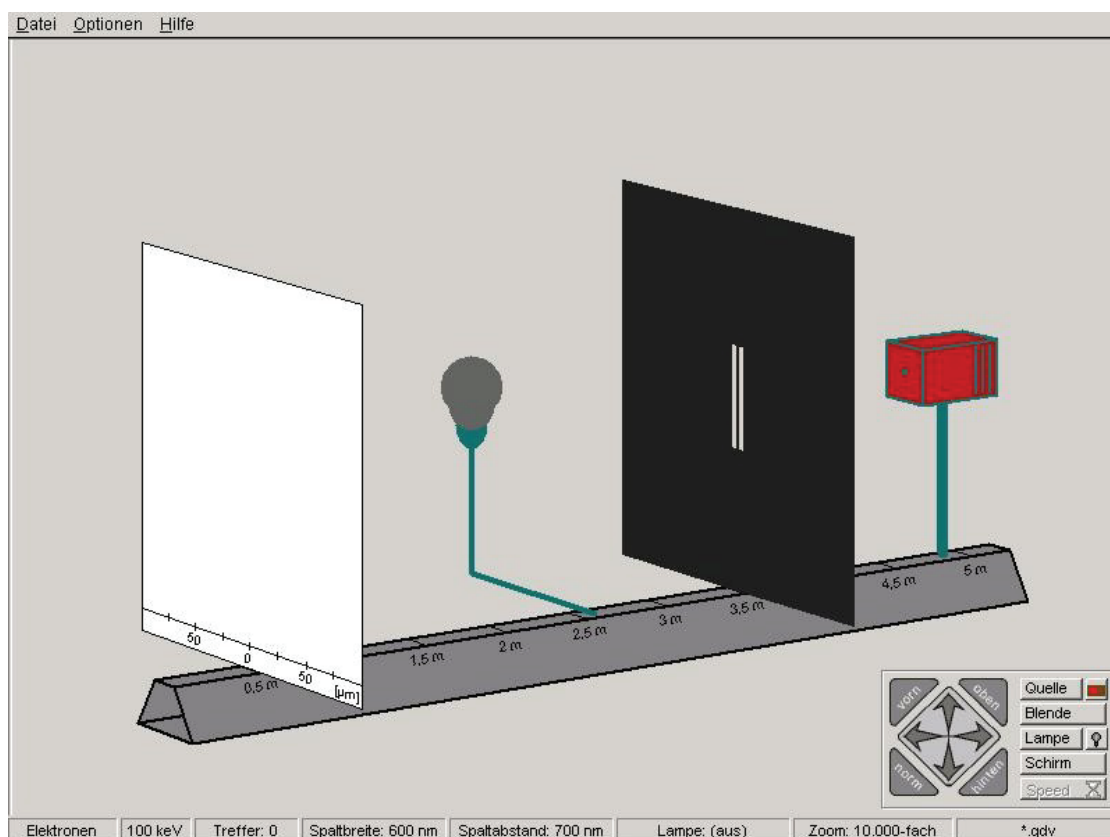


Fig. 2 - Layout do software do experimento virtual da fenda dupla.

III. Descrição do questionário de avaliação

O instrumento elaborado para levantamento de concepções sobre FQ (OSTERMANN; RICCI, 2003b) consiste de três partes: a primeira contendo seis questões abertas extraídas ou adaptadas de artigos de pesquisa em ensino de Física; uma segunda parte consistindo de 11 questões objetivas retiradas de concursos vestibulares, Exames Nacionais de Cursos (“Provão” do MEC) e artigos de pesquisa em ensino de Física; e a terceira contendo 20 afirmativas, frente às quais o professor-aluno deve posicionar-se empregando uma escala Likert (OSTERMANN; RICCI, 2004).

As questões abertas foram elaboradas para que o professor-aluno pudesse expressar-se livremente acerca de aspectos essenciais da FQ e que representam uma ruptura radical com a visão de mundo clássica. São elas:

1) *Por volta de 1860, os físicos acreditavam que a física havia atingido o máximo grau de desenvolvimento e que só seriam possíveis pequenas alterações e avanços secundários. Porém, no início do século XX, descobriu-se uma série de fatos que não podiam ser explicados pela física clássica, e que provocaram uma crise que se traduziu no surgimento de um novo paradigma teórico (a física moderna e contemporânea). Cite e comente, no mínimo, três desses fatos.*

- 2) *Na sua opinião, existe diferença essencial entre as visões de mundo proporcionadas pela física clássica e pela física quântica? Justifique sua resposta.*
- 3) *Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos clássicos?*
- 4) *Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos quânticos?*
- 5) *Na sua opinião, qual é a principal diferença entre objetos clássicos e objetos quânticos?*
- 6) *O que você entende por “fóton”?*

As questões objetivas foram incluídas para verificar se os professores estão aptos a ensinar conteúdos básicos de FQ a alunos de ensino médio com a finalidade de prepará-los para o exame de vestibular (7 questões). Com elas também se visa detectar possíveis lacunas na formação de graduação dos professores acerca de conteúdos de FQ abordados no “Provão” do MEC (3 questões). Apenas uma das questões objetivas foi adaptada de um artigo de pesquisa em ensino de Física (GIL et al, 1988).

A terceira parte consistiu de 20 afirmativas frente às quais o professor-aluno deveria posicionar-se usando uma escala tipo Likert (CF = concordo fortemente; C = concordo; NO = não tenho opinião; D = discordo; e DF = discordo fortemente). Elas foram, em grande parte, inspiradas no artigo de Ireson (2000), no qual o autor propõe uma série de 29 afirmativas sobre a FQ. Esse trabalho foi o único encontrado na literatura em que há uma apresentação completa de um instrumento para a detecção de concepções de estudantes sobre a FQ. Parte das questões foram adaptadas para o nosso instrumento. As afirmativas sobre modelos atômicos foram formuladas a partir de um artigo (PETRI; NIEDDERER, 1998) em que os autores estudam como o processo de aprendizagem, em Física Atômica, de um único estudante é influenciado por diferentes concepções do átomo simultaneamente compartilhadas por ele. As restantes foram especialmente elaboradas para esta parte do instrumento.

IV. Alguns resultados da aplicação do instrumento antes e depois da discussão da unidade conceitual: análise das questões abertas

A análise da aplicação do instrumento antes e depois da unidade conceitual será apresentada apenas para as questões abertas. As respostas foram organizadas em categorias, mostradas abaixo, seguidas de alguns exemplos de respostas dadas pelos professores-alunos, quando pertinentes. Ao total, foram 15 professores-alunos que responderam ao pré e ao pós-teste. Os números que aparecem após cada categoria referem-se à quantidade de alunos cujas respostas se enquadraram na mesma, o primeiro número correspondendo aos resultados obtidos antes das aulas, e o segundo aos resultados obtidos após a unidade.

Questão 1:

Nesta questão, os seguintes fatos históricos eram esperados como resposta correta: o problema da radiação do corpo negro, a descoberta do efeito fotoelétrico, os resultados negativos do experimento de Michelson e Morley e o movimento browniano.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 0/0.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 0/0.

Categoria 3: Cita e comenta de forma correta 3 fatos: 4/2.

Exemplo: *Discussão em torno da natureza da luz (partícula ou onda). Radiação de corpo negro. Efeito fotoelétrico. Existência ou não do éter (experimento de Michelson-Morley).*

Categoria 4: Cita e comenta corretamente 2 fatos e erra/não responde ao terceiro: 2/3.

Exemplo: *Teoria da relatividade: experiências com a luz que estavam em desacordo com a mecânica clássica. Efeito fotoelétrico: possibilidade de interação da luz com a matéria. Surgimento da Física Quântica.*

Categoria 5: Cita e comenta 1 só fato corretamente, errando ou não respondendo os outros: 4/7.

Exemplo: *Difração da luz; Efeito fotoelétrico: arrancar cargas(elétrons) de uma superfície metálica pelo bombardeamento com luz (de alta frequência) - caráter corpuscular da luz; Dualidade onda-partícula.*

Categoria 6: Cita só 1 fato corretamente, mas sem comentá-lo, ou o comenta erradamente: 4/2.

Exemplo: *Efeito fotoelétrico: funcionava com maior intensidade quando analisado sob radiação ultra-violeta..*

Categoria 7: Cita 2 fatos corretamente, sem comentá-los, ou os comenta erradamente: 1/0.

Exemplo: *Efeito fotoelétrico. Difração de elétrons. Radiação de corpo negro.*

Categoria 8: Cita 3 fatos corretamente sem comentá-los: 0/0.

Categoria 9: Cita 1 fato corretamente, sem comentá-lo: 0/1.

Exemplo: *Dualidade onda-partícula, princípio da incerteza; teoria da relatividade.*

Curiosamente, o número de respostas totalmente corretas (categoria 3) diminuiu após as aulas, o que talvez seja conseqüência do fato de que aspectos eminentemente históricos foram quase que totalmente negligenciados na unidade conceitual (o mesmo acontecendo na unidade formal). Por outro lado, os resultados nas categorias 4, 5, 6 e 7 mostram que alguns dos alunos cujas respostas antes da unidade enquadraram-se na categoria 6 e 7, migraram para as categorias 4 e 5 após as aulas, o que representa um aprimoramento em seu conhecimento da FQ. Foi possível também identificar uma idéia compartilhada por alunos que não responderam corretamente à questão: confusão entre elaborações teóricas, que se configuram como articulação de um novo paradigma, com fatos que constituem anomalias para o paradigma estabelecido (por exemplo, a natureza dual da matéria, ou a teoria da relatividade).

Questão 2:

Obviamente, esta é uma questão muito ampla e que dá margem a várias possíveis respostas corretas. Mas esperávamos, ao menos, que os alunos tivessem a clareza de que há uma teoria para descrever objetos macroscópicos (Física Clássica) e outra para descrever os objetos microscópicos (Física Quântica). Outro ponto crucial esperado era a questão determinismo *versus* indeterminismo.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 0/0.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 5/1.

Exemplo: *A física clássica trata de velocidades baixas; na mecânica quântica, as velocidades são próximas e/ou iguais a da luz.*

Categoria 3: Respondeu corretamente: 2/11.

Exemplo: *Sim, a Física Clássica possui uma visão determinista, que permite o conhecimento absoluto das variáveis de uma partícula. Na física clássica, conhecendo-se as condições iniciais, é possível determinar o movimento posterior de um objeto. Na física quântica, existe o princípio da incerteza, que proíbe a determinação precisa para grandezas como posição e momentum. Ao mesmo tempo, os conceitos de matéria e onda adquirem outro sentido.*

Categoria 4: Não vê distinções entre Mecânica Quântica e Mecânica Clássica: 1/0.

Exemplo: *A física clássica é um caso particular da física quântica.*

Categoria 5: Resposta parcialmente correta: 7/3.

Exemplo: *Sim, a física quântica trabalha com modelos que não são comprovados pela física clássica. Esses modelos são criados na tentativa de explicar fenômenos que ocorrem na dimensão do átomo e do núcleo. Na física clássica, os fenômenos são observáveis.*

É notável que apenas dois alunos tenham respondido corretamente a essa questão antes da implementação da nova versão da unidade conceitual, enquanto que, após as aulas, onze alunos a tenham respondido corretamente. Verificou-se, inicialmente, uma tendência por parte de alguns alunos de confundirem a relatividade especial com a FQ, o que não mais ocorreu após as aulas. Após a unidade, a maioria foi capaz de destacar aspectos essencialmente diferentes da Física Clássica e da FQ.

Questão 3:

Nesta questão, esperávamos que as seguintes propriedades essenciais de objetos clássicos fossem ao menos mencionadas: (a) que eles são objetos macroscópicos; (b) que eles possuem momentum linear e posição bem definidos, simultaneamente, no caso do objeto ser uma partícula ou um corpo material; (c) que suas posições espaciais obedecem a equações de movimento determinísticas (leis de Newton no caso de partículas e equações de Maxwell no caso de ondas EM's); e (d) que eles são, sempre, ou partículas ou ondas.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 0/0.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 4/5.

Exemplo: *Massa, velocidades baixas, inércia, estão sob a influência da força gravitacional.*

Categoria 3: respondeu corretamente : 6/8.

Exemplo: *Os objetos clássicos possuem grandezas (massa, velocidade, posição) que são sempre bem determinadas.*

Categoria 4: Resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 5/2.

Exemplo: *Massa, posição, quantidade de movimento, carga elétrica.*

Houve uma pequena melhora no número de respostas certas a essa questão, bem como uma diminuição significativa no número de respostas parcialmente erradas, o que revela um aprimoramento no conhecimento dos alunos a respeito das características fundamentais de objetos clássicos. Identificamos também que muitos alunos que não conseguiram responder corretamente à questão, antes da aplicação da unidade conceitual, associaram atributos físicos a objetos clássicos que são, também,

propriedades de objetos quânticos (a massa, por exemplo); e que, erradamente, os objetos clássicos possuem sempre pequenas velocidades, ou seja, que um objeto quântico deve ser sempre relativístico.

Questão 4:

Aqui esperávamos que as respostas mencionassem: (a) são objetos do mundo microscópico; (b) são objetos para os quais o momentum linear e a posição são observáveis complementares, ou seja, não estão bem definidos simultaneamente; (c) seu movimento no espaço não obedece a uma equação de movimento determinística, como no caso dos objetos clássicos; e (d) são objetos com um caráter dual, isto é, em determinadas situações se comportam como partículas e em outras como ondas.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 2/0.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 9/4.

Exemplo: *São pacotes de energia com velocidades iguais a c.*

Categoria 3: Respondeu corretamente : 2/7.

Exemplo: *Possuem dualidade onda-partícula, isto é, possuem comportamento que ora se manifesta como matéria, ora com características ondulatórias. Obedecem ao princípio da incerteza.*

Categoria 4: Resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 2/4.

Exemplo: *Os objetos quânticos não possuem obrigatoriamente grandezas bem definidas.*

Antes das aulas, apenas dois alunos tinham conhecimento das propriedades dos objetos quânticos, enquanto que, após a unidade, sete alunos responderam corretamente a essa questão. Acreditamos que tal resultado, uma melhora significativa no conhecimento dos alunos a respeito das características básicas dos objetos quânticos, deva-se basicamente à abordagem adotada nas aulas.

Questão 5:

Esperávamos que os alunos mencionassem, pelo menos, as seguintes características: (a) o tamanho do objeto (macroscopia *versus* microscopia); (b) os objetos clássicos não obedecem ao Princípio da Incerteza; (c) não existe dualidade onda-partícula para os objetos clássicos, ao contrário dos quânticos; e (d) o

comportamento dos objetos clássicos é determinístico, enquanto o dos quânticos é probabilístico.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 2/0.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 3/1.

Exemplo: *Quanticamente, matéria e energia se equivalem.*

Categoria 3: Respondeu corretamente : 6/11.

Exemplo: *O caráter dual, que existe nos objetos quânticos e não existe nos objetos clássicos.*

Categoria 4: Resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 4/3.

Exemplo: *A energia ser quantizada ou contínua.*

Após a unidade, onze alunos conseguiram apontar, corretamente, diferenças básicas entre objetos clássicos e quânticos, enquanto, antes das aulas este número era de apenas seis. Houve, também, uma diminuição significativa no número de alunos que responderam imprecisamente ou de forma parcialmente incorreta. Tal resultado corrobora a conclusão obtida no comentário feito em relação à questão anterior.

Questão 6:

Nesta questão, o esperado era que o aluno, ao menos, respondesse com uma frase clichê do tipo “É o quantum de uma onda eletromagnética”. Após as aulas, seria esperada a menção à natureza quântica do fóton.

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: 0/1.

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 1/0.

Exemplo: *Fóton é energia.*

Categoria 3: Respondeu corretamente : 11/13.

Exemplo: *É um objeto quântico sem massa que transporta energia. É um bóson e, por isso, não obedece ao Princípio da Exclusão de Pauli.*

Categoria 4: Resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 3/1.

Exemplo: *É a luz tratada como partícula e não como onda. É uma partícula muito energizada por estar com alta velocidade (velocidade da luz).*

Essa foi a questão em que houve o maior número de acertos, tanto antes como após as aulas, embora tenham prevalecido respostas tipo clichê (“quantum de luz”). A melhora geral observada nas respostas foi relativamente pequena, provavelmente porque muitos dos alunos conheciam respostas tipo clichê para a questão, mesmo antes da implementação da unidade conceitual. Vale assinalar também que pela primeira vez (considerando as turmas de 2002 e 2003), após a unidade conceitual, alguém mencionou que o fóton é um objeto quântico!

V. Considerações finais

Neste trabalho, relatamos uma experiência didática inovadora para a abordagem de conceitos de FQ na formação de professores. A necessidade de introdução de temas de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio é bastante justificada em nosso meio, no entanto, ainda são discretas as iniciativas na direção de uma melhor formação para o professor.

Algumas conclusões podem ser delineadas a partir da experiência de implementação da unidade didática.

De maneira geral, os resultados obtidos nas questões abertas revelaram uma melhora significativa nas respostas formuladas: o número de respostas completas e corretas subiu significativamente, principalmente, nas questões 2, 4 e 5 que tratavam das propriedades dos objetos quânticos que os distinguem radicalmente dos clássicos (o foco da unidade). Tal conclusão é reforçada pelo fato de que as questões citadas referem-se a um assunto pouco explorado nas abordagens tradicionais da Física Quântica e cuja própria natureza impede que sejam formuladas respostas do tipo clichê. Inicialmente, alguns estudantes confundiam noções da Física Quântica com as da Relatividade Especial (por exemplo: considerar que objetos quânticos fossem necessariamente relativísticos). Isso não mais ocorreu após a implementação da nova versão da unidade conceitual.

A opção em elaborar uma unidade didática eminentemente conceitual mostrou-se um avanço em relação a abordagens tradicionais, sinalizando transposições didáticas possíveis da Física Quântica para o ensino médio, sem a necessidade de apelo a analogias semiclássicas da “velha” Física Quântica.

Na mesma direção, a elaboração de roteiros exploratórios revelou-se um passo adiante em relação à postura ingênua, tão difundida em nosso meio, que faz uso da “tecnologia pela tecnologia” (como se o simples fato de se usar as novas tecnologias constitua uma melhoria para o aprendizado em relação ao ensino tradicional). No caso específico da utilização de *softwares*, como os apresentados neste artigo, é fundamental que o professor desempenhe o papel de *articulador*, instigando (e ajudando) os alunos a explorar todas as possibilidades oferecidas por esses recursos. Ao final do processo, os estudantes devem ser capazes de compreender, em termos dos conceitos abordados teoricamente em sala de aula, tudo aquilo que é revelado nas simulações realizadas e

explorado nos roteiros. A partir da experiência relatada, acreditamos que o uso desses roteiros constitui uma estratégia relevante para que o professor desempenhe seu papel de promover mudanças nas concepções dos alunos, principalmente as que se referem às diferenças entre os objetos clássicos e os quânticos.

VI. Referências

- DUGAS, R. **A History of Mechanics**. New York: Dover Publications Inc, 1955.
- GIL PEREZ, D.; SENENT, F.; SOLBES, J. Analisis critico de la introducción de la física moderna de la enseñanza media. **Revista de enseñanza de la Física**, Rosario, v. 2, n. 1, p. 16-21, 1988.
- GILMORE, R. **Alice no País do Quantum**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.
- IRESO, G. The quantum understanding of pre-university physics students. **Physics Education**, Bristol, v. 35, n. 1, p. 15-21, 2000.
- KRAGH, H. Erwin Schrödinger and the wave equation: the crucial phase. **Centauros**, v. 26, 155-196, 1982.
- KÖBERLE, R. Sobre a Gênese da Mecânica Ondulatória. **Revista Brasileira de Física**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 243-273, 1979.
- KRAGH, H. Erwin Schrödinger and the Wave Equation: the crucial phase. **Centauros**, v. 26, p. 154-197, 1982.
- MOORE, W. **Schrödinger: Life and Thought**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, Melville, v. 70, n. 3, p. 200-209, mar. 2002.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica na formação de professores de Física. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS, IV, 2003a, Bauru, SP. **Atas...**
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Noções básicas de Mecânica quântica: um levantamento junto a professores de Física de ensino médio. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, XV, 2003b, Curitiba. **Atas...**

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 2, 2004.

PESSOA, O. JR. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

PETRI, J.; NIEDDERER, H. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. **International Journal of Science Education**, Londres, v. 20, n. 9, p. 1075-1088, nov. 1998.

RICCI, T. F.; OSTERMANN, F. Uma Introdução Conceitual à Mecânica Quântica para professores do ensino médio. Textos de Apoio ao Professor de Física, Porto Alegre, n. 14, Instituto de Física, UFRGS, 2003.

SCHRÖDINGER, E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. **The Physical Review**, v. 28, n. 6, p. 1049-1070, 1926.

WHEATON, B. R. Louis de Broglie and the origins of wave mechanics. **The Physics Teacher**, v. 22, n. 5, mai. 1984.

WICK D. **The Infamous Boundary**. New York: Springer-Verlag, 1995.

Apêndice 1: Roteiros Exploratórios

Roteiro Exploratório para o Interferômetro de Mach-Zehnder

- 1) Com o *software* aberto, identifique o caminho seguido pelos raios luminosos. Isso é ilustrado com uma animação de uma seqüência de frentes de ondas planas da luz, bastando clicar *WAY OF RAYS*. Para iniciar o programa, clique o botão *STARTING*.
- 2) Identifique onde estaria a segunda saída do interferômetro (que não é mostrada no *software*). Identifique também os dois separadores de feixe (semi-espelhos).
- 3) Ligue a fonte na opção LASER. Observe o que aparece na tela do interferômetro. Tente explicar o que você vê, sabendo que uma reflexão em um espelho introduz um deslocamento de fase na luz correspondente a um quarto de comprimento de onda da mesma ¹.
- 4) O que seria visto numa tela colocada na segunda saída do interferômetro (não mostrada no programa)?
- 5) Tente explicar como a interferência luminosa pode levar à formação do padrão com a forma observada.

¹ Isso é demonstrado, por exemplo, no artigo *Phase shift between the transmitted and the reflected optical fields of a semireflecting lossless mirror is $\pi/2$* , Vittorio Degiorgio, Am. J. Phys. **48** (1), 81-82, janeiro de 1980.

- 6) Se retirássemos do interferômetro o *segundo* semi-espelho e se um feixe luminoso de intensidade I_0 incidisse no aparelho, que intensidade você esperaria medir em cada uma das saídas do mesmo?
- 7) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez². Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico (opção *SINGLE PHOTONS*). Observe o que aparece na tela.
- 8) A partir do que se observa na tela, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Como se manifesta o comportamento ondulatório, quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande? Compare o padrão que vai se formando na tela com o padrão que era observado com a fonte na opção *LASER*.
- 9) Coloque um detector num dos braços do interferômetro. Observe que aparecem dois contadores, um que registra o número de fótons emitidos pela fonte, até um dado instante, e outro que registra o correspondente número de fótons que seguiram pelo braço onde foi colocado o detector. Observe também que uma luzinha acende na fonte, sempre que esta emite um fóton, e também no detector, sempre que o mesmo registra um fóton. O que se observa?
- 10) Clique uma vez no botão *SPEED*. Observe a contagem dos detectores. O que se pode concluir?
- 11) Observe o padrão de impactos na tela. Ele revela interferência? Por quê? O que fez o detector?
- 12) Clique no botão *RESET*. Coloque um segundo detector no outro braço do aparelho. Ligue a fonte na opção *SINGLE PHOTONS*. O que se observa nos contadores dos detectores e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte? E na tela? Clique uma vez na opção *SPEED*. O que se observa nas contagens dos detectores?
- 13) Para um fóton individual, descreva como se comporta um separador de feixe. Relacione sua resposta com o fato de que o separador de feixe é um semi-espelho que divide um feixe luminoso em dois de igual intensidade.
- 14) Se um fóton atravessa o aparelho de cada vez, como você acha que a “doutrina de Copenhague” explica a formação do padrão de interferência observado na tela? (*Dica: o padrão não foi formado pela interferência entre diferentes fótons, pois apenas um atravessa o interferômetro e chega à tela de cada vez, sempre! Se um fóton interfere, é consigo mesmo.*)
- 15) Agora vamos começar a trabalhar com os polaróides. Coloque um primeiro polaróide (*POLFILTER 1*) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte na opção *SINGLE PHOTONS*. Qual o padrão observado na tela (depois de esperar que um número muito grande de impactos se acumule)?

² Veja os artigos de Høglund, C. K. & Mandel, L., em *Phys. Rev. Lett.* **56**, 58 (1986), e o de Grangier, P., Roger, G. & Aspect, A., em *Europhysics Letters* **1**, 173 (1986).

16) Coloque, agora, um segundo polaróide no outro braço (*POLFILTER 2*). Por *default*, os eixos de polarização dos dois estarão alinhados (os dois a 90°). O que se observa na tela (novamente, para um número grande de impactos)?

17) Gire o eixo de um dos polaróides em 45° e veja o que acontece com o padrão na tela. O que mudou em relação ao padrão anteriormente observado? Tente explicar o que se vê.

18) Cada fóton é detectado, na tela, como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

19) Uma maneira de descobrir por qual dos braços passa cada fóton é usar dois polaróides, um em cada braço, com os eixos cruzados em 90° . Dessa maneira, se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com **sua** polarização dada pelo eixo de polarização do polaróide que se encontra naquele braço. Então tudo o que temos que fazer é colocar algum aparato na saída do interferômetro capaz de revelar o estado de polarização do fóton emergente. Uma maneira de realizar isso, com nosso *software*, é usar um terceiro polarizador colocado entre a saída do aparelho e a tela. Se seu eixo de polarização for paralelo ao de um dos dois outros polaróides nos braços, ele será necessariamente paralelo a um e ortogonal ao outro. **De maneira que o fóton que chegar à tela terá passado necessariamente pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide** (o fóton que passou pelo outro braço não pode alcançar a tela). Podemos implementar essa idéia no *software*. Vamos realizar essa experiência virtual para descobrir por onde passou o fóton.

20) Gire o eixo de polarização do primeiro polaróide (*POLFILTER 1*) para 0° (ou 360°), coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gire seu eixo para que fique paralelo ao do primeiro polaróide (0° ou 360°). Ligue a fonte em regime monofotônico e espere até que se acumule um número muito grande de impactos na tela. Que padrão você observa? Repita o experimento usando o *LASER* (regime clássico) e observe o que se vê na tela. Os padrões são os mesmos nos dois casos?

21) O que o resultado obtido no experimento até agora significa para nosso modelo mental do fóton como um objeto que possui o atributo posição dentro do interferômetro? Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo dentro do interferômetro? E quando não se observa um padrão de interferência? Por quê? (*Obs: se os fótons possuísem o atributo posição quando dentro do aparelho, então cada fóton só poderia interagir com um dos polaróides nos braços do aparelho, certo? Mas isso não se sustenta. Pois para o fóton "saber" se ele está destinado a atingir a tela onde, antes de termos cruzado os eixos dos polaróides, havia um mínimo de interferência e não chegava luz, ele teria que dispor da informação sobre os eixos de polarização de ambos os polaróides, e não apenas daquele pelo qual ele teria passado, de acordo com o modelo mental de partícula possuidora do atributo posição.*)

22) Uma objeção óbvia ao argumento do parágrafo anterior é que o fóton poderia ter se dividido em duas partes no primeiro separador de feixe, atravessado o aparelho e, de alguma forma, ter finalmente recombinado-se no segundo separador de feixe. Como se poderia verificar se isso é verdade ou não?

23) Substitua os dois polaróides dos braços do aparelho por dois detectores de fótons. Esses detectores estão posicionados, perpendicularmente, exatamente sobre o eixo central de cada

braço do interferômetro. Verifique se os dois detectores registram simultaneamente a entrada de cada fóton individual no aparelho. O que você observa? (lembre-se de que, quando o detector absorve um fóton, uma luzinha acende no lado do mesmo.)

24) Retornando ao tema da questão 2, com os dois semi-espelhos presentes no interferômetro e dois detectores de fótons, D1 e D2, colocados, respectivamente, sobre o eixo central das saídas 1 e 2 do aparelho, qual **seria** a probabilidade de fóton ser detectado por D1? E por D2?

25) Com respeito à questão anterior, o que poderia acontecer com a referida probabilidade se D1 e D2 fossem deslocados em relação ao eixo central de cada braço?

26) Considerando a interpretação de Copenhagen da Mecânica Ondulatória, usando o Princípio da Superposição Linear de Estados bem como o Postulado da Redução de Estados, tente dar uma explicação para o que ocorre com o estado do fóton quando tentamos descobrir por qual dos braços ele passa.

27) Se fosse possível modificar a posição dos semi-espelhos e dos espelhos no programa, ou retirá-los, como o arranjo experimental poderia ser alterado para verificarmos comportamento corpuscular para o fóton?

Bibliografia Básica

1. MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **Am. J. Phys.**, v. 70, n. 3, p. 200-209, 2002.

2. PESSOA JR., O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v. 19, n. 1, p. 27-48, 1997.

Roteiro Exploratório para o software da fenda dupla

1) Por default, o feixe de partículas incidente é um feixe de elétrons. Vamos trabalhar inicialmente com elétrons. Eles atravessam as fendas do anteparo e são detectados numa tela sensível, imprimindo nela um ponto luminoso.

Ligue a fonte e observe o padrão de impactos que vai se formando na tela (pode usar a opção SPEED para apressar o andamento). A fonte emite um elétron de cada vez, de modo que, com certeza, apenas um elétron está atravessando o aparelho de cada vez. Quaisquer que sejam os objetos quânticos que constituem o feixe, todos são emitidos pela fonte com uma mesma energia cinética (feixe mono-energético).

2) Questão 1: De que maneira você identifica o comportamento corpuscular e o comportamento ondulatório dos elétrons a partir do que aparece na tela?

3) Você pode trocar de partícula colocando o cursor do mouse sobre o desenho da fonte e clicando no botão esquerdo. Você pode, inclusive, escolher fazer incidir um feixe de partí-

culas clássicas (mono-energéticas), como bolinhas ou balas. Experimente e veja o que aparece na tela. Tente explicar.

4) Experimento 1: A partir do que você observa, determine o comprimento de onda dos elétrons. Usando a relação de De Broglie, determine o momentum linear dos mesmos. Admitindo, inicialmente, que os elétrons sejam não-relativísticos, determine também a velocidade deles. Caso esta se revele comparável à velocidade da luz no vácuo (elétron relativístico), você terá que rever seu cálculo da velocidade, realizando-o a partir do momentum relativístico do elétron, dado pela relação:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5) Questão 2: Com base na Mecânica Ondulatória e na doutrina de Copenhagen, explique a formação do padrão de impactos na tela. Lembre-se de que a função de onda (a amplitude de probabilidade do objeto quântico), que descreve o estado dos elétrons, é análoga a ondas sonoras ou a ondas se propagando na superfície da água. Por exemplo, a função de onda atrás do anteparo da fenda dupla pode ser imaginada como uma superposição de duas ondas cilíndricas (com frentes de onda de forma cilíndrica) emergindo de cada fenda (A e B). Considerando que cada uma das funções de onda emergentes de cada fenda seja normalizada, escreva a função de onda total no anteparo como

$\Psi = (\Psi_A + \Psi_B) / \sqrt{2}$. Use a interpretação estatística de $|\Psi|^2$ e mostre, matematicamente, que a interferência surge dos “termos cruzados” no módulo ao quadrado da função de onda acima. Identifique estes termos. Usando os fatos de que a função de onda é complexa e de que todo complexo pode ser escrito na forma polar,

$$\Psi = |\Psi| e^{i\phi}$$

onde i é a unidade imaginária e ϕ é a fase do complexo, mostre que o termo de interferência pode ser escrito na forma

$$|\Psi_A| \cdot |\Psi_B| \cdot \cos(\Delta\phi),$$

onde $\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$ é a diferença de fase entre as funções de onda A e B no ponto da tela. Identifique também os termos não-cruzados e interprete-os de acordo com o que aparece na tela.

6) Discussão: Na atividade virtual com o interferômetro de Mach-Zehnder, discutimos como a concepção usual do fóton como um objeto localizado em um dos braços do aparelho leva a um conflito com o experimento. Esse conflito é completamente contra-intuitivo e não podemos esperar que os estudantes e pessoas em geral (e nós mesmos!) aceitem facilmente uma conclusão desse tipo. Portanto, apresentamos um raciocínio análogo envolvendo elétrons: suponha, inicialmente, que cada elétron seja um objeto localizado (possuidor do atributo posição) que passe por apenas uma das fendas do anteparo. Nesse caso, portanto,

ele não poderia “saber” se a outra fenda está bloqueada (fechada) ou não (aberta), de modo que sua posição na tela não deveria ser influenciada por tal fato. Então, o mesmo padrão de impactos deveria aparecer na tela se (a) ambas as fendas estão simultaneamente abertas em qualquer instante t ou se (b) apenas uma das fendas está aberta neste instante e, depois, somente a outra.

7) Experimento 2: Temos como testar se a hipótese feita no item anterior está correta ou não. Para isso, basta clicar com o botão esquerdo do mouse sobre o desenho do anteparo. Abre-se uma janela onde temos como bloquear qualquer das duas fendas, além de poder escolher a largura das fendas (slit-width) e a distância entre elas (slit-distance). Valores sugeridos para estes dois últimos atributos são: slit-distance de 700 nm (nanômetros) e slit-width de 114 nm. Ligue a fonte primeiro com uma das fendas bloqueada e depois com as duas fendas abertas. O que se observa no padrão de impactos na tela? O software nos permite também obter, em gráficos, os resultados previstos analiticamente pela teoria, os quais podemos comparar com nossos resultados “experimentais” (virtuais). Basta clicar com o botão esquerdo do mouse sobre a tela. Surgirá uma janela onde, clicando nas opções the result e evaluation, podemos obter esse tipo de informação em gráficos e histogramas. Explore um pouco esses recursos.

8) Questão 3: O que os resultados obtidos significam para a nossa hipótese inicial (item 6), de que os elétrons se comportam dentro do aparelho como objetos localizados que passam apenas por uma das fendas?

9) Discussão: Note que o feixe é tão fraco que apenas um elétron entra no aparelho de cada vez (trata-se de um feixe “mono-eletrônico”, análogo a um feixe luminoso monofotônico). Portanto, se existe alguma interferência acontecendo, é a de cada elétron consigo mesmo!

10) Questão 4: Nossa discussão agora será a respeito do processo quântico de medição. Vamos partir da questão anterior, perguntando: Se o elétron não possui o atributo posição bem definido, qual é o resultado de uma medição de sua posição?

11) Experimento 3: O experimento virtual que usaremos para responder a isso é adaptado de um famoso “experimento de pensamento” (gedanken experiment) idealizado por Richard Feynman. A lâmpada que aparece no programa DoppelSpalt simboliza um instrumento de medida de posição. Ela emite luz que é espalhada pelos elétrons que passaram pelas fendas. Alguns dos raios (fótons) espalhados chegam aos nossos olhos (ou aos fotossensores utilizados) e podemos inferir de onde eles foram espalhados (pelo elétron), com base na direção de sua incidência. Assim, temos como descobrir a posição do elétron em relação a cada fenda, ou seja, se ele passou por uma fenda ou pela outra. Ligue a lâmpada clicando na opção LAMP. (A) Observe por trás de cada fenda. Observe se, em algum instante, ocorre dois flashes de luz simultâneos provenientes das fendas. O que isso significa? (B) O que acontece com o padrão de impactos na tela? Tente explicar o que aparece na tela.

12) Experimento 4: Clique com o botão esquerdo do mouse sobre o ícone da lâmpada e observe a janela que se abre. (A) Experimente variar o comprimento de onda da luz da

lâmpada e tente explicar o que ocorre com o padrão visto na tela. (B) Experimente agora variar a intensidade da luz da lâmpada (por default, ela sempre se encontra em 85% de seu valor máximo). Vá aos extremos: coloque-a em 0% e, depois, em 100%. Tente explicar o que se vê na tela em cada caso. OBS: Você pode também trabalhar com as previsões teóricas, veja a OBS feita no experimento 2 (item 6).

13) Questão 5: Com base no postulado da redução de estados (“colapso” da função de onda), explique o que observou nos experimentos 3 e 4.

Bibliografia Básica

1. MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **Am. J. Phys.**, v. 70, n. 3, p. 200-209, 2002.

2. PESSOA JR., O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. **Rev. Bras. Ens. Fis.**, v. 19, n. 1, p. 27-48, 1997.

Apêndice 2

Roteiro de questões para discussão dos oito primeiros capítulos do livro “Alice no País do Quantum”

- 1) Explique a afirmativa: “Na mecânica quântica, a energia total de um sistema é constante somente a longo prazo”.
- 2) Como partículas chamadas virtuais podem “existir”? Explique.
- 3) Como o texto caracteriza elétrons e fótons?
- 4) Explique a afirmativa: “aquilo que não é proibido é compulsório”.
- 5) Discuta os resultados obtidos com o experimento mental de fenda dupla com objetos clássicos.
- 6) Discuta os resultados obtidos com o experimento mental de fenda dupla com objetos quânticos.
- 7) O padrão de interferência formado por elétrons só ocorre no experimento mencionado acima porque os elétrons que passam por uma fenda estão interferindo com aqueles que atravessam a outra fenda? Explique.
- 8) Em que situação os elétrons são detectados como partículas? Explique.
- 9) Em que consiste o problema da medida em mecânica quântica?
- 10) Diferencie férmions de bósons.
- 11) Explique o conceito de vácuo na mecânica quântica.
- 12) Explique a afirmativa: “os fótons são como sinais que ajudam a identificar os diferentes tipos de átomos”.
- 13) Explique como o átomo pode ser estável se, no interior do núcleo, os prótons repelem-se fortemente.

Apêndice 3

Avaliação da unidade conceitual

Q1) Diferencie objetos clássicos de objetos quânticos.

Q2) Explique em que consistem o processo de medida e o princípio da superposição linear de estados na Mecânica Quântica. Dê exemplos.

Q3) Explique a relação que existe entre o princípio da incerteza de Heisenberg e a dualidade onda-partícula.

Q4) A figura no quadro mostra um esquema do interferômetro de Mach-Zehnder com dois detectores D1 e D2 situados sobre o eixo central de cada braço. Considerando que o aparelho opera em regime quântico, responda:

a) Depois que o fóton passou por S1, mas antes de incidir em S2, em qual caminho ele se encontra, em A ou em B?

b) Como a mecânica quântica explica o que se observa em cada um dos detectores?

c) Discuta o que se mede em D1 e D2 ao colocarmos um detector de fótons no braço A do interferômetro. Explique se, neste caso, o fenômeno é corpuscular ou ondulatório.

d) Explique como o uso de polaróides permite discutir a questão da dualidade onda-partícula nesse experimento.

e) Explique o que se mediria em D1 e D2 se o semi-espelho S2 fosse retirado do arranjo experimental.

f) Como o arranjo experimental do interferômetro poderia ser alterado para a verificação do comportamento corpuscular do fóton?

Q5) Considere o experimento virtual de fenda dupla realizado com feixes de elétrons.

a) Explique o padrão de impactos na tela se (1) ambas as fendas estão abertas simultaneamente em um dado instante t ou se (2) apenas uma das fendas está aberta neste instante t , depois, somente a outra.

b) Discuta o que acontece com o padrão de impactos na tela quando ligamos uma lâmpada para saber por qual fenda os elétrons passam.

c) Explique a influência da intensidade e do comprimento de onda da luz da lâmpada nesse experimento.

d) Com base no postulado da redução de estados, explique o que ocorre quando ligamos a lâmpada.

e) Em que situação os elétrons poderiam ser detectados como partículas neste experimento? Explique.

f) Discuta os resultados do experimento de fenda dupla com objetos clássicos.