

UMA UNIDADE DIDÁTICA CONCEITUAL SOBRE MECÂNICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE FÍSICA¹

Fernanda Ostermann

Trieste S. F. Ricci

Instituto de Física, UFRGS
Caixa Postal 15051, Campus do Vale
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo

Neste trabalho, apresentamos os resultados obtidos com a implementação de uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica (MQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” da primeira turma do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MPEF-UFRGS). A avaliação da aprendizagem foi realizada a partir da aplicação de um instrumento especialmente construído para fazer um levantamento das noções básicas sobre Mecânica Quântica (MQ) de professores de Física de ensino médio em formação e em serviço. Os resultados da aplicação do instrumento demonstraram que os professores-alunos apresentavam lacunas importantes em relação a aspectos conceituais básicos de MQ antes do curso. Com o desenvolvimento da unidade conceitual, foi possível promover mudanças em suas concepções, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

Palavras-chave: Formação de Professores; Mecânica Quântica; Avaliação da Aprendizagem.

Introdução

Este trabalho tem por objetivo relatar a implementação de uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica (MQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” (TFMC1) da primeira turma (18 alunos) do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física (MPEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A avaliação da aprendizagem foi realizada a partir da aplicação de um instrumento especialmente construído para fazer um levantamento das noções básicas sobre Mecânica Quântica (MQ) de professores de Física de ensino médio em formação e em serviço (Ostermann e Ricci, 2003)².

A motivação para o trabalho surgiu da necessidade de preparar um curso introdutório à MQ para professores-alunos do MPEF que rompesse com a abordagem dos cursos tradicionais geralmente ministrados na graduação e na pós-graduação. Dada a natureza do Mestrado Profissionalizante - cujo objetivo é melhorar a qualificação profissional de professores de Física do nível médio através do desenvolvimento de um produto educacional que possa promover mudanças na sua prática docente - a disciplina TFMC1 busca promover a compreensão aprofundada dos conceitos e das noções básicas da MQ em moldes diferentes da abordagem tradicionalmente adotada em cursos sobre o tema, pelo menos até recentemente. Nesta abordagem, há uma forte ênfase no emprego do formalismo matemático como mera ferramenta matemática, na resolução de listas de problemas, além de introduzir a MQ de maneira fortemente correlacionada com a Física Clássica, seja em seus fundamentos e

¹ Trabalho apresentado no 4^o Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências. Bauru, 25 a 29 de novembro de 2003.

² Trabalho apresentado no XV SNEF Belo Horizonte, 21 a 26 de março de 2003.

pressupostos mais básicos, seja em sua história. A abordagem tradicional, portanto, acaba relegando a um segundo plano a questão crucial de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos em si mesmos (pensemos, por exemplo, no tempo gasto com modelos semiclássicos). Com a inclusão de uma unidade conceitual de MQ, esperamos ser possível resgatar aspectos fundamentais para o entendimento da natureza quântica desde o início do aprendizado, a fim de que o professor aprenda significativamente o conteúdo; e que isso o permita vislumbrar possibilidades de introdução do tema no ensino médio. O trabalho teve início com uma revisão da literatura recente acerca do ensino de MQ, tanto em nível médio como em cursos universitários de graduação. A revisão envolveu trabalhos 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 MQ. A seguir, comentamos, brevemente, os trabalhos encontrados na literatura que mais nos subsidiaram para o desenvolvimento da unidade conceitual e do instrumento de avaliação.

Müller e Wiesner (2002), da Universidade de Munique, Alemanha, elaboraram um curso introdutório em MQ no qual tópicos conceituais relevantes foram ensinados a alunos do nível correspondente ao nosso ensino médio. Uma das novidades do curso é que se pretende ensinar diretamente os princípios básicos da mecânica ondulatória, sem qualquer referência prévia a modelos atômicos semiclássicos, tais como o modelo de Bohr. Outra novidade é o uso exploratório de dois “softwares” do tipo “bancada virtual” (um do interferômetro de Mach-Zehnder e outro do experimento da fenda dupla realizado com feixes de elétrons), com os quais os estudantes são estimulados a explorar, desde o início do curso, os aspectos puramente quânticos que contrastam radicalmente com nossa experiência cotidiana. Esse trabalho exerceu forte influência sobre a preparação do curso de MQ descrito em uma seção subsequente, no qual também foram utilizados os mesmos dois “softwares” citados, com ajuda de roteiros exploratórios especialmente elaborados.

Pinto e Zanetic (1999) utilizaram a noção de perfil epistemológico, de Gaston Bachelard, como referencial teórico para elaborar um teste para investigar o perfil epistemológico do aluno. Esse teste serviu de referencial para uma atividade educacional desenvolvida em escola pública com objetivo de abordar a MQ no ensino médio.

Com a finalidade de introduzir temas de Física Moderna no ensino médio, Cavalcante e Tavolaro (2001) desenvolveram uma oficina de Física Moderna a partir do estudo do comportamento dual da matéria. A oficina resultou na produção de materiais didáticos de baixo custo e na realização de uma série de experimentos de interferência, com a finalidade de desenvolver no aluno uma intuição da MQ em sua versão ondulatória (Mecânica Ondulatória de Schrödinger).

Para fazer com que estudantes dos cursos de engenharia compreendam melhor os conceitos centrais da MQ, Greca *et al.* (2001) desenvolveram uma proposta didática de ensino sobre o tema. O trabalho foi implementado em três turmas da disciplina de Física IV, para alunos de engenharia, onde esses temas são tradicionalmente introduzidos, sendo que em uma delas usou-se a abordagem fenomenológica-conceitual proposta no trabalho e nas outras duas o assunto foi introduzido da maneira tradicional. Os resultados obtidos da análise de grupos indicam que a nova abordagem utilizada foi bem sucedida.

Scarani e Suarez (1998) propõem introduzir a MQ a partir da exploração da interferência luminosa num arranjo experimental que é, basicamente, um interferômetro de Mach-Zehnder. O conceito de dualidade onda-partícula é particularmente explorado com os alunos. Infelizmente, os autores não relatam os resultados da aplicação do curso em sala de aula.

Apesar de não propor qualquer instrumento ou material didático ou estratégia de ensino concreta, um artigo de Pessoa Jr. (1997), abordando de maneira muito feliz aspectos conceituais fundamentais da MQ, foi-nos muito útil como suporte na elaboração da unidade

conceitual da disciplina de introdução à MQ do MPEF. O aspecto mais original da proposta teórica de Pessoa Jr. é que ela pressupõe que, desde o início do aprendizado, o aluno tenha contato com as diferentes interpretações da teoria da MQ, o que, provavelmente, é relevante para o entendimento do tema.

Analisando o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) do nível A (“A-Level”³) e na universidade, na Inglaterra, Jones (1991) critica a ênfase dada ao efeito fotoelétrico e à “velha Teoria Quântica”. O autor questiona a abordagem estritamente historiográfica com que os temas são abordados. Segundo ele, o experimento do efeito fotoelétrico não é a pedra angular da MQ e, portanto, construir o ensino a partir do conceito de fóton não é somente uma grande simplificação, mas também uma imagem falsa que pode fixar-se na mente dos estudantes. Jones fornece algumas sugestões preliminares para evitar tal caminho historiográfico da velha teoria quântica, propondo que sejam introduzidos os “caminhos lógicos” que levam à formulação da Schrödinger e Heisenberg da MQ.

Solbes *et al.* (1987), ao estudarem a introdução dos modelos quânticos na escola e no 1º ano universitário, na Espanha, através da análise de 56 livros-texto, concluíram que, de maneira geral, tal introdução ocorre de forma incorreta e confusa. Por exemplo, a maioria dos textos para o nível médio não aborda o efeito fotoelétrico como ruptura com a Física Clássica. Com relação à dualidade onda-partícula, alguns autores continuam encarando-a como decorrentes de algumas deficiências técnicas. Os autores assinalam que erros conceituais em livros constituem uma das fontes mais importantes das concepções alternativas que os alunos possuem.

Stefanel (1998) relata uma experiência de três anos com uma proposta didática de introdução de tópicos de MQ nos cursos de nível médio na Itália, em particular no 5º ano do “Liceo Scientifico Statale”. A abordagem apresenta uma estrutura que pode ser esquematizada em quatro níveis de intervenção: experiências introdutórias e apresentação da gênese da MQ (5-6 horas); aprofundamento quantitativo sobre efeito fotoelétrico, efeito Compton, fóton, experiência de Frank-Hertz, modelos atômicos e princípio da incerteza (5-6 horas); princípios básicos da MQ: interpretação probabilística da função de onda e do princípio da superposição (5-7 horas); aplicação dos conceitos da MQ para explicar as propriedades da matéria (6-8 horas). A avaliação dos alunos sugeriu que os resultados de aprendizagem foram satisfatórios. No entanto, Stefanel (1998) concluiu que, entre outros aspectos, é preciso realizar pesquisa adicional acerca do ensino de MQ para verificar, por exemplo, se a utilização de modelos clássicos está ou não relacionada à origem de erros conceituais em MQ e se é possível analisá-los para construir uma abordagem didática eficiente.

Fischler e Lichtfeldt (1992) consideram que a aprendizagem de FMC é dificultada porque o ensino, freqüentemente, emprega analogias clássicas. Por exemplo, o átomo de Bohr, uma vez aprendido, passa a ser um obstáculo para a compreensão de idéias modernas. Uma nova concepção de abordagem da MQ para o nível médio é sugerida, a partir de cinco premissas básicas: referências à Física Clássica devem ser evitadas; introdução do efeito fotoelétrico a partir das características dos elétrons e não das dos fótons; a interpretação estatística do fenômeno deve ser usada e descrições dualistas devem ser evitadas; relação de incerteza de Heisenberg deve ser introduzida desde o início (e formulada para objetos quânticos); exclusão do modelo de Bohr no tratamento do átomo de hidrogênio.

Gil *et al.* (1988) mostram, a partir de uma análise de 42 livros didáticos espanhóis de Física, que a maioria destes não fazia nenhuma referência ao caráter não-linear do desenvolvimento científico, às dificuldades que originaram a crise da Física Clássica e às profundas diferenças conceituais entre a Física Clássica e a Moderna. Para os autores, essa

³ Curso pré-universitário dirigido a estudantes com idades entre 16 e 18 anos.

visão simplista com que a FMC é ensinada nas escolas produz sérias concepções alternativas. Através de um questionário respondido por 536 alunos, entre 16 e 18 anos, verificou-se que a grande maioria ignorava a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica e desconhecia as diferenças entre Física Moderna e Clássica. Os autores sugerem, então, uma abordagem construtivista para o ensino de FMC na qual a orientação tradicional de ensino-aprendizagem, que enfatiza a simples transmissão/recepção de conhecimento, seja substituída por um currículo que envolve os alunos em “atividades” e os coloca frente a situações problemáticas através das quais o conhecimento pode ser (re)construído. Os conceitos de FMC foram introduzidos tendo-se como referencial um modelo construtivista de ensino-aprendizagem na perspectiva da mudança conceitual e metodológica (Gil *et al.*, 1988; Solbes *et al.*, 1987). As quatro primeiras atividades, que constituem a introdução ao programa completo, envolveram: revisão das principais contribuições da Física Clássica; formação de uma imagem do conceito de matéria compatível com a Física Clássica; reconhecimento de que a Física é uma construção humana e que pode não resolver alguns problemas relevantes. Reconhecimento, ao mesmo tempo, de que a Física pré-galileana foi substituída pelo novo paradigma clássico; concepção da Física Clássica como um corpo coerente de conhecimentos que consegue explicar quase todos os fenômenos conhecidos no século XIX, falhando em alguns poucos casos; enumeração destes problemas não resolvidos. O programa completo de atividades foi aplicado para 180 alunos (entre 16 e 18 anos) e os resultados obtidos foram satisfatórios (Gil *et al.*, 1988).

Ireson (2000) discute os resultados da aplicação de um questionário tipo Likert (29 afirmativas sobre MQ) respondido por 342 estudantes de graduação em Física de seis instituições do Reino Unido. (Este instrumento serviu de forte inspiração para a elaboração do nosso questionário.) A partir de uma análise estatística das respostas, o autor sugere diretrizes para a organização de cursos sobre o tema, em especial, assinalar a necessidade de partir-se das idéias prévias dos estudantes para a construção dos significados contra-intuitivos da MQ.

Em um estudo de caso, Petri e Niedderer (1998) descrevem o processo de aprendizagem de um estudante de nível médio, na Alemanha, em aulas sobre modelos atômicos. Apesar de o ensino visar a concepção quântica de átomo (modelo de nuvem eletrônica), o acompanhamento da aprendizagem do aluno mostrou que suas concepções de átomo podem ser descritas como uma seqüência de modelos metaestáveis que inicia com o modelo planetário e termina em três modelos que co-existem: o planetário, o modelo de “estado de elétron” e o modelo de nuvem eletrônica.

Johnston *et al.* (1998) estudaram como as idéias fundamentais de MQ são entendidas por estudantes de graduação em Física que foram bem sucedidos em disciplinas sobre o tema. A partir de perguntas como “O que é uma partícula?”; “O que é uma onda?”; “Qual a diferença entre indeterminação e incerteza?”, os autores constataram que os estudantes formulavam respostas fragmentadas expressas por modelos mentais que não passavam de uma coleção de fatos isolados. Os autores alertam para a necessidade de repensar os cursos universitários de MQ, principalmente no que se refere ao seu caráter extremamente matemático.

De modo geral, concluímos que existe uma enorme carência de discussões acerca dos aspectos conceituais e filosóficos da MQ, tanto nos cursos de graduação como nos de pós-graduação. Para usar uma expressão coloquial, na maioria das vezes os professores de MQ “se escondem atrás da matemática”, evitando abordar tais aspectos. Outra conclusão a que chegamos é que são também escassas as propostas de introdução de MQ no ensino médio e na formação de professores, e não apenas no Brasil ou na América Latina. Também podemos concluir que praticamente inexistem pesquisas para investigar concepções de alunos e professores em MQ, o que justifica o investimento na elaboração de um instrumento para

levantar tais concepções e na estruturação de uma unidade didática conceitual sobre MQ descritos a seguir.

Descrição do questionário de avaliação

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

As questões abertas foram elaboradas para que o professor-aluno pudesse expressar-se livremente acerca de aspectos essenciais da MQ 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”?*

Com as 11 questões objetivas, pretendemos verificar se os professores estão aptos a ensinar conteúdos básicos de MQ a alunos de ensino médio com o objetivo de prepará-los para o exame de vestibular (7 questões). Por outro lado, essas questões também visam detectar possíveis lacunas na formação de graduação dos professores acerca de conteúdos de MQ 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). Essas afirmativas foram, em grande parte, inspiradas no artigo de Ireson (2000), no qual o autor propõe uma série de 29 afirmativas sobre a MQ. 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 MQ. Parte das questões foram adaptadas para o nosso instrumento. As afirmativas sobre modelos atômicos foram formuladas a partir de um artigo (Petri e 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.

Resultados da aplicação do instrumento antes da discussão da unidade conceitual

A análise da aplicação do instrumento antes e depois da unidade conceitual foi organizada em três partes, segundo a própria estrutura do instrumento. As respostas às questões abertas foram organizadas em categorias, mostradas abaixo, seguidas de alguns exemplos de respostas dadas pelos professores-alunos, quando pertinentes. (O número após cada categoria refere-se ao número de alunos na respectiva categoria.)

Questão 1:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **2**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **7**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico – metais bombardeados com luz emitem fótons e se esta mesma luz fosse usada sobre outro metal, este poderia não ser capaz de emitir fótons, mesmo que aumentasse a intensidade da luz incidente, era necessário trocar a luz incidente. A energia não era emitida na forma contínua e sim em quantidades ou múltiplos definidos. Princípio da Incerteza, no qual é admitido a incapacidade de determinar com precisão e simultaneamente 2 grandezas que caracterizam uma partícula*

Categoria 3: Cita e comenta de forma correta 3 fatos: **1**

Exemplo: *Radiação de corpo negro – acreditava-se que um corpo negro emitia radiação continuamente, ou seja, seu espectro de radiação incluía todas as frequências, de zero a infinito, distribuídas de acordo com a temperatura absoluta do corpo. Esta descrição não concordava com o que era observado. Efeito fotoelétrico – a descrição da luz como onda EM não concordava com o que se observava, especialmente o fato de a energia cinética dos elétrons liberados não depender da intensidade do feixe luminoso. Velocidade da luz no vácuo – a velocidade da luz medida em qualquer situação era sempre a mesma, não importando se a fonte estava em movimento ou não.*

Categoria 4: Cita e comenta corretamente 2 fatos e erra/não responde ao terceiro: **1**

Exemplo: *Radiação de corpo negro – não pode ser explicada pelo EM. Modelo atômico – os elétrons deveriam espiralar rapidamente em direção ao núcleo. Efeito fotoelétrico – a intensidade luminosa não é responsável pelo mesmo, o que não era justificável pelo EM.*

Categoria 5: Cita e comenta 1 só fato corretamente, errando ou não respondendo os outros: **2**

Exemplo: *Catástrofe do ultravioleta – Rayleigh e Jeans tentavam construir a fórmula da curva de temperatura (radiação do corpo negro). A Mecânica Clássica não admitia essa construção. Quando chegava na região do ultravioleta, explodia ao infinito a curva.*

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

Exemplo: *a descoberta dos raios X (final do século XIX); e efeito fotoelétrico (1905) e a experiência de Millikan com gotas de óleo.*

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

É notável que apenas um dos 18 alunos tenha citado e comentado corretamente três fatos que constituíam anomalias sérias a ponto de provocar uma crise na Física Clássica, enquanto que a maioria (7) respondeu tudo erradamente ou de forma confusa, apesar de já terem realizado disciplinas de introdução à MQ. Portanto, a quase totalidade dos professores-alunos desconhecia fatos históricos supostamente bem difundidos.

Questão 2:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **3**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **7**

Exemplo: *Sim, com a Física quântica temos a inserção da dependência da massa e energia em função da velocidade das partículas; num ambiente em que espaço é função do tempo.*

Categoria 3: Respondeu corretamente: **5**

Exemplo: *Sim, na física clássica, probabilidade só é aplicada a um número grande de estados (como na termodinâmica). Já na física quântica, mesmo uma partícula individualmente é tratada de maneira probabilística.*

Categoria 4: Não vê distinções entre MQ e MC: **1**

Categoria 5: Resposta parcialmente correta: **2**

Exemplo: *Sim, existe diferença essencial, pois na mecânica clássica trabalhamos com corpos macroscópicos, de baixa energia (movimento) e, por conseguinte, baixa velocidade. Já na física quântica, os corpos são microscópicos, com elevadas velocidades.*

Observa-se que, na categoria 2, como no exemplo transcrito, muitos mesclaram, de forma confusa, conceitos da MQ com conceitos da relatividade especial, deixando transparecer que concebem os objetos do mundo microscópico e quântico como automaticamente relativísticos.

Questão 3:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **2**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **13**

Exemplo: *São propriedades gravitacionais e elásticas. Gravitacionais: peso, energia potencial. Elásticas: forças de contato em geral, força elástica, energia de deformação.*

Categoria 3: respondeu corretamente : **1**

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **2**

Exemplo: *Massa, força, energia (contínua), tempo sendo absoluto, campos gravitacional, elétrico e magnético; partículas como partículas.*

Questão 4:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **2**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **9**

Exemplo: *Devem estar com velocidades que alterem seus eventos de tempo e comprimento. Não se tem certezas, mas apenas probabilidades.*

Categoria 3: respondeu corretamente : **3**

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **4**

Exemplo: *A quantização da energia, momentum, velocidade da luz como sendo absoluta; algumas “partículas” funcionando ou como onda ou como partícula.*

Nas duas questões anteriores, os alunos, em maioria, revelaram desconhecer as propriedades essenciais dos objetos clássicos e quânticos. É notável, ainda, que eles tenham dado respostas erradas, em maior número, referentes aos objetos clássicos, quando poderíamos esperar o contrário. Também se observa a recorrência da confusão entre conceitos quânticos e relativísticos.

Questão 5:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **3**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **9**

Exemplo: *A principal diferença é que os objetos clássicos claramente podem ser descritos por modelos matemáticos, enquanto que a física quântica não nos permite o mesmo.*

Categoria 3: respondeu corretamente : **3**

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **3**

Exemplo: *No clássico, temos certezas; no quântico, incertezas.*

Percebe-se que a maioria dos alunos não consegue verbalizar ou elaborar as diferenças contrastantes entre os objetos clássicos e os quânticos. Provavelmente isso se deva ao relativo descaso do ensino tradicional com essas questões mais conceituais, reforçado pelo uso freqüente de analogias semiclássicas na abordagem inicial da MQ em tais cursos.

Questão 6:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **1**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **6**

Exemplo: *partículas que viajam em “pacotes” e emitem energia.*

Categoria 3: respondeu corretamente : **8**

Exemplo: *Quantum de luz.*

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **3**

Exemplo: *Trata-se uma partícula resultante de uma colisão. Por ex., quando um elétron passa de um nível atômico para outro nível mais externo, ele perde energia. No entanto, ao retornar ao nível atômico anterior, ele emite luz, o que está diretamente relacionado com o fóton.*

Esta questão foi a de maior índice de acertos, o que não é surpreendentemente, pois é possível respondê-la usando frases prontas e curtas, tipo clichês (veja o exemplo apresentado). Nenhuma das respostas, porém, faz menção à natureza quântica do fóton.

Na segunda parte do instrumento (11 questões objetivas), a média de acertos dos professores-alunos ficou em 6,6 antes das aulas. As questões OB01 (sobre efeito fotoelétrico), OB10 (princípio da incerteza) e OB11 (emissão atômica) foram as de menor acerto, enquanto as questões OB4 (reações nucleares) e OB5 (afirmativas sobre Física Quântica) foram as que tiveram maior índice de acertos. É notável que uma questão sobre efeito fotoelétrico esteja entre as de menor frequência de respostas corretas, por se tratar de um assunto tradicionalmente explorado nos concursos de vestibular e abordado nos cursos preparatórios para este tipo de concurso.

Na última parte (20 afirmativas com escala Likert), para um máximo de 100 pontos, a média no pré-teste foi de 72,8. A questão L8 (“Quando um elétron ‘salta’ de um determinado orbital para outro de energia mais baixa, emitindo um fóton, ele não se encontra em um estado com energia bem definida”), foi a de menor acerto. Esse resultado, de certa maneira, era esperado, dado que a questão L8 se refere a um assunto muito pouco abordado nos cursos tradicionais e sequer mencionado em livros de divulgação científica. A questão de maior índice de acertos foi a L5 (“A luz sempre se comporta como uma onda”), o que revela que, de alguma forma, eles já possuíam a informação sobre o caráter dual da luz.

Descrição da Unidade Didática Conceitual

A disciplina foi desenvolvida num total de 16 encontros de manhã inteira, em semestre normal, estruturada em 3 unidades: primeiro a *unidade conceitual* (objeto de interesse deste artigo), uma segunda *unidade formal* e uma terceira *unidade de aplicações*. A unidade conceitual foi ministrada ao longo de cinco encontros de uma manhã, com a participação dos autores deste artigo.

Inicialmente, foi feita uma discussão dos conceitos mais básicos envolvidos na descrição clássica e na descrição quântica da natureza, especialmente no que se refere às propriedades dinâmicas de objetos clássicos e de objetos quânticos. Os fótons e os elétrons foram abordados, desde o início, como protótipos de objetos quânticos elementares, não-massivos e massivos, respectivamente. Com base nestes objetos quânticos concretos e popularmente conhecidos, diversos aspectos conceituais básicos da MQ foram introduzidos e exemplificados, tais como função de onda e densidade de probabilidade quântica, a interpretação de Copenhagen para o módulo ao quadrado da função de onda, o Princípio da Superposição Linear de estados e o Princípio da Incerteza. Deixa-se claro para o aluno, desde o início, que existem várias versões (“pictures”) da MQ, e que o curso aborda tão somente a

versão de Schrödinger, ou seja, a Mecânica Ondulatória. Essa escolha justifica a utilização da Ótica Ondulatória como uma espécie de “porta de entrada” para a MQ, ao invés de, como tradicionalmente é feito, usar a Mecânica Clássica para desempenhar esta função. Cremos que a discussão de modelos semi-clássicos, como feito na abordagem tradicional, dificulta, muitas vezes, a aprendizagem significativa de conceitos quânticos sem análogos mecânico-clássicos. Preferiu-se, então, realizar uma revisão da Ótica Ondulatória partindo-se do experimento de Young da fenda dupla, depois caracterizando-se a luz como uma onda eletromagnética, seguindo-se uma discussão sobre interferência, difração e polarização de ondas eletromagnéticas, finalizando-se com a explicação do funcionamento detalhado do interferômetro de Mach-Zehnder sob o ponto de vista clássico.

Em seguida, discutem-se mais detalhadamente vários aspectos e fenômenos envolvendo os protótipos escolhidos para objetos quânticos (fótons e elétrons). Começando com fótons, parte-se da teoria de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico, discute-se a dualidade onda-partícula e o experimento de Compton, o regime quântico (monofotônico) para feixes luminosos, culminando com a explicação do funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder sob o ponto de vista quântico e com o “experimento de pensamento” da bomba quântica. Essa discussão teórica toda é articulada a uma atividade virtual exploratória utilizando um *software* livre, tipo “bancada virtual”, sobre o interferômetro de Mach-Zehnder (obtido em www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfere.html). Esse *software* permite ao usuário confrontar os regimes clássico e quântico da luz e mostrou ser uma ferramenta didática muito potente para a aprendizagem dos conceitos básicos de MQ envolvidos.

Para os elétrons, começa-se com a hipótese de de Broglie sobre sua natureza ondulatória, ilustrada pelo o experimento de Davisson e Germer com interferência de elétrons e pelo experimento de Thompson com difração de elétrons; segue-se uma discussão teórica do “experimento de pensamento” da fenda dupla com feixes de elétrons, culminando com a discussão deste experimento de pensamento realizado dentro de uma câmara de Wilson, onde o princípio da incerteza é ilustrado. Essa discussão teórica também é articulada a uma atividade virtual exploratória utilizando um *software* livre, tipo “bancada virtual”, sobre o experimento da fenda dupla com elétrons (obtido em www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html). Esse *software* permite ao usuário realizar virtualmente o experimento tanto com feixes de elétrons como com apenas um elétron incidindo de cada vez no aparato, e revelou-se, como no caso do *software* citado na parágrafo anterior, extremamente útil para o processo ensino-aprendizagem de conceitos básicos de MQ.

Também como parte da unidade conceitual, foram promovidas discussões de listas de questões sobre o conteúdo desenvolvido, e uma atividade de leitura do livro “Alice no país do quantum”, de autoria do físico Robert Gilmore (Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1998), obra em prosa que aborda vários dos aspectos conceituais da MQ tratados nessa unidade.

Ao final da realização da unidade, vários dos professores-alunos se manifestaram muito favoravelmente quanto às atividades virtuais desenvolvidas no curso, inclusive sugerindo que, numa próxima aplicação da unidade, essas atividades fossem contempladas com mais tempo para sua realização. Isso parece indicar, por si só, a grande relevância deste tipo de atividade e é nossa intenção, de fato, implementar a sugestão na próxima versão da unidade didática conceitual, no segundo semestre de 2003.

Resultados da aplicação do instrumento depois da implementação da unidade conceitual

Na aplicação do teste após o término do curso, a primeira parte do instrumento de avaliação apresentou os seguintes resultados:

Questão 1:

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

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **1**

Exemplo: *Dualidade onda-partícula; princípio da incerteza; substituição do conceito de órbita pelo de orbital na estrutura do átomo.*

Categoria 3: Cita e comenta de forma correta 3 fatos: **1**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico – resultados experimentais eram contraditórios com a teoria ondulatória da luz; Radiação de corpo negro – considerando que um corpo a uma temperatura absoluta T irradia uma quantidade de energia com frequências contínuas levava a uma conclusão não plausível: que a intensidade da radiação crescia ao infinito com a frequência; em quaisquer circunstâncias, a velocidade da luz era a mesma.*

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

Exemplo: *Radiação de corpo negro: Planck introduziu o conceito de quantização de energia; Efeito Compton: onde percebe-se o caráter corpuscular da radiação; Efeito fotoelétrico: observação do caráter corpuscular da radiação.*

Categoria 5: Cita e comenta 1 só fato corretamente, errando ou não respondendo os outros: **3**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons de uma superfície de metal devido à incidência de luz; Efeito Compton: espalhamento do elétron devido à incidência de luz (fóton); Interferência de elétron: dualidade onda-partícula.*

Categoria 6: Cita só 1 fato corretamente, mas sem comentá-lo, ou o comenta erradamente: **7**

Exemplo: *Efeito Compton; Efeito fotoelétrico; Experimento de Young; Estrutura fina do espectro de hidrogênio.*

Categoria 7: Cita 2 fatos corretamente, sem comentá-los, ou os comenta erradamente: **3**

Categoria 8: Cita 3 fatos corretamente sem comentá-los: **1**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico; radiação de corpo negro; movimento browniano.*

Foi preciso criar uma nova categoria de respostas (categoria 8) a essa questão, a fim de dar conta de todas as novas respostas obtidas da pós-aplicação do teste.

Questão 2:

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

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **1**

Exemplo: *Existem, e muitas delas são de difícil compreensão como, por exemplo, um fóton que não possui massa, mas apresenta energia.*

Categoria 3: Respondeu corretamente: **14**

Exemplo: *Sim. A física clássica é determinista enquanto que a física quântica é indeterminista (probabilística). Observam-se fenômenos no mundo microscópico que não podem ser explicados pelas teorias clássicas, como o efeito fotoelétrico. Na física clássica, grandezas como posição e momentum são bem definidos, enquanto que na MQ essas grandezas não comutam, isto é, não podemos definir com precisão posição e momentum simultaneamente.*

Categoria 4: Não vê distinções entre MQ e MC: **0**

Categoria 5: Resposta parcialmente correta: **3**

Exemplo: *Sim. Usando luz e emissão de fótons com uso de interferência, é possível mostrar que há diferença entre física clássica e física quântica.*

Questão 3:

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

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **4**

Exemplo: *Possuem sempre massas. Podem ser distinguidos entre si.*

Categoria 3: respondeu corretamente : **8**

Exemplo: *Os objetos clássicos possuem atributos de posição e momentum bem definidos. Podem ser observados por suas trajetórias.*

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **6**

Exemplo: *Podem ser estudados como partículas. Têm, ao mesmo tempo, posição e momentum bem definidos.*

Questão 4:

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

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **2**

Exemplo: *Massa, energia e a função de onda ao quadrado (probabilidade de encontrar uma partícula).*

Categoria 3: respondeu corretamente : **10**

Exemplo: *Dualidade e indistinguibilidade. Um objeto quântico pode apresentar comportamento corpuscular ou ondulatório.*

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **6**

Exemplo: *Interferência, pequenas dimensões, grandes velocidades (próximas à da luz), incerteza na posição e na velocidade.*

Questão 5:

Categoria 1: Não respondeu/não lembra: **1**

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **1**

Categoria 3: respondeu corretamente : **14**

Exemplo: *Objetos quânticos, ao contrário dos clássicos, são probabilísticos, além de possuírem propriedades incompatíveis.*

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **2**

Exemplo: *A principal diferença é poderem ou não ser distinguidos entre si e o princípio da incerteza para os objetos quânticos.*

Questão 6:

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

Categoria 2: Respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **0**

Categoria 3: respondeu corretamente : **15**

Exemplo: *Quantum de luz; pacote de energia; energia emitida quando o elétron salta de um nível de energia para outro mais baixo.*

Categoria 4: resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **3**

Exemplo: *É uma partícula de massa de repouso nula que apresenta uma função de onda associada.*

De maneira geral, os resultados acima revelam que, de fato, houve uma melhora significativa nas respostas dadas na primeira parte do pós-teste: o número de professores-alunos que simplesmente não responderam caiu para zero em quase todas as questões (exceção para a quinta questão, onde ainda houve uma pessoa que não a respondeu); o número de respostas completas e corretas subiu significativamente, em algumas das questões chegando a aumentar em mais de quatro vezes; e o mesmo ocorreu também com as respostas parcialmente corretas. Acreditamos que essa melhoria possa ser atribuída especificamente à

implementação de uma unidade conceitual, pois, em cursos tradicionais, aspectos cruciais para o entendimento da MQ são discutidos apenas superficialmente. Na segunda parte do instrumento (11 questões objetivas), a média de acertos subiu de 6,6 no pré-teste para 8,4 no pós-teste. A questão OB1 continuou sendo a que teve média mais baixa. A questão OB10, sobre o princípio da incerteza, passou a ser uma das com maior número de acertos no pós-teste, enquanto que no pré-teste ela estava entre as que tinham menor índice de acertos, juntamente com a questão OB9 (sobre o princípio da exclusão de Pauli). Na última parte (20 afirmativas com escala Likert), a média subiu de 72,8 no pré-teste para 79,9 pontos no pós-teste. A questão L19 (sobre o princípio da incerteza aplicado a modelos atômicos) teve a menor média, e a L4 (sobre o caráter corpuscular do elétron), a mais alta.

Discussão dos resultados e algumas conclusões

Os resultados da aplicação do pré-teste em relação à primeira parte do instrumento revelaram que os professores-alunos apresentavam lacunas importantes em relação a aspectos conceituais de MQ, o que corroborou a idéia de construir uma unidade exclusivamente conceitual para o curso de MQ do MPEF. O pós-teste, em relação à mesma parte do instrumento, revelou ter havido uma significativa melhora na compreensão de aspectos conceituais básicos da MQ, o que era o objetivo principal que tínhamos em mente com a implementação de uma unidade didática conceitual.

Um teste *t* mostrou que há diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,000$) nas respostas dos alunos antes e depois da unidade conceitual, tanto para as questões objetivas como nas do tipo Likert. Finalmente, ao cruzarmos as respostas das 11 questões objetivas com as das 20 afirmativas do tipo Likert, antes e depois da unidade conceitual, verificamos que há uma fraca correlação entre seus desempenhos nessas duas partes do instrumento. Ou seja, um bom desempenho em questões objetivas de vestibular não implica necessariamente um bom desempenho nas questões tipo Likert de forte conteúdo conceitual. Em síntese, os dados mostram que houve mudanças nas concepções dos professores-alunos com a implementação da unidade didática conceitual sobre MQ, e que elas não ocorreram ao acaso, mas sim como consequência da abordagem conceitual relatada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 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, dezembro de 2001.
- FISCHLER, H.; LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions International. **Journal of Science Education**, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, abril/junho de 1992.
- 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.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 444-457, dezembro de 2001.
- IRESO, G. The quantum understanding of pre-university physics students. **Physics Education**, Bristol, v. 35, n. 1, p. 15-21, 2000.

JONES, D. G. C. Teaching moderns physics: misconceptions of the photon that can damage understanding. **Physics Education**, Bristol, v. 26, n. 2, p. 93-98, março de 1991.

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

MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, Melville, v. 70, n. 3, p. 200-209, março de 2002.

PESSOA JR, O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 27-48, março de 1997.

PETTRI, 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, novembro de 1998.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abril de 1999.

SCARANI, V.; SUAREZ, A. Introducing quantum mechanics: one particle interferences. **American Journal of Physics**, Woobury, v. 66, n. 8, p. 718-721, agosto de 1998.

SOLBES, J. *et al.* Errores conceptuales en los modelos atomicos cuánticos. **Investigación y Experiencias didácticas**, v. 5, n. 3, p. 189-195, 1987.

STEFANEL, A. Una experiencia en el marco de la introducción de la física cuántica en la escuela secundaria. **Revista de Enseñanza de la física**, Cordoba, v. 11, n. 2, p. 35-44, 1998.