O ENSINO/APRENDIZAGEM DE MECÂNICA QUÂNTICA NA LICENCIATURA EM FÍSICA: UM ESTUDO DE CASO

Marcos Antônio Barros[1] [marcos_fis@hotmail.com]
Universidade Estadual da Paraíba, CEP 58100-000
Campina Grande, PB - Brasil
Olival Freire Jr. [olival.freire@gmail.com]
Instituto de Física, Departamento de Física Geral, Universidade Federal da Bahia
Campus de Ondina, 40210-340, Salvador, BA - Brasil

Resumo

O presente artigo se propõe, inicialmente, a descrever de forma detalhada o procedimento metodológico de nosso estudo em que foi priorizada a abordagem qualitativa. A opção por uma investigação qualitativa ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, bem como do problema que se colocava frente ao desafio de um estudo de caso sobre a formação de Professores de Física em relação à Mecânica Quântica, em curso de Licenciatura em Física. Propomos também, fazer uma breve descrição dos dados colhidos nas observações, nas entrevistas e nas diversas avaliações (provas e exercícios) realizadas em sala de aula, durante o acompanhamento da disciplina Estrutura da Matéria I, do curso de Licenciatura em Física na UFBA. Em seguida, sistematizaremos essas informações, de forma a poder ter uma visão mais acurada a respeito da formação desses licenciandos ser ou não adequada em relação aos fundamentos da Mecânica Quântica.

Palavras-chave: formação de professores de física, ensino e aprendizagem de Mecânica Quântica.

INTRODUÇÃO

Atualmente a Mecânica Quântica (MQ) é o fundamento teórico de muitas áreas da alta tecnologia moderna. O laser não seria imaginado sem a teoria quântica, sem ela não teríamos os semicondutores, sem os semicondutores não haveria o computador moderno e sem o computador moderno não existiriam coisas tão simples como o telefone celular. Dessa forma, há um despertar natural para esses fundamentos, uma vez que essa miniaturização da eletrônica e da nanotecnologia chama a atenção, faz parte da vida das pessoas e consequentemente exige dos cursos de formação uma instrução mais adequada e mais eficaz da MQ, no sentido de que os futuros professores possam inserir esses conhecimentos no Ensino Médio. No entanto, pesquisas realizadas nos últimos anos, por educadores brasileiros e estrangeiros, revelam que a maioria dos alunos que saem dos cursos de formação em Licenciatura em Física termina as disciplinas relativas aos fundamentos da MQ e suas aplicações, com sérias dificuldades conceituais (Ostermann e Ricci, 2005). Por conseguinte, a aplicabilidade desses fundamentos no Ensino Médio têm se revelado um verdadeiro desastre pedagógico, pois os professores de Física que ali lecionam não se sentem preparados, não dominam e nem sabem quais conteúdos ensinar.

Para esse quadro acima, a literatura tem nos mostrado ainda que o ensino de MQ nos cursos de Física tem sido muito formal e de difícil compreensão (Mannila et al, 2002; Greca and Freire, 2003). No entanto, as pesquisas não nos mostram por que a formação do licenciando em física é inadequada em MQ. Nessa direção, tendo optado por uma abordagem qualitativade pesquisa, descrevemos e analisamos como se dá o processo de formação do licenciando em Física em relação ao ensino da disciplina Mecânica Quântica (MQ), utilizando-nos de vários métodos e instrumentos de coleta de dados que são peculiares e indicadores adequados para o entendimento da natureza do

[1] Doutorando do Programa de Pós Graduação em Ensino, História e Filosofia das Ciências da UFBA.

nosso problema de pesquisa, como a observação direta (não participante), análises documentais e entrevistas.

Neste artigo, apresentamos a análise dos primeiros resultados dessa pesquisa[2] desenvolvida junto aos alunos da disciplina Estrutura da Matéria I, no oitavo período do curso de Licenciatura em Física da UFBA – noturno, levando em consideração os seguintes instrumentos de coleta de dados: a observação não participante, documentos didáticos (livro texto, provas e exercícios) e as entrevistas. A relevância desta pesquisa reside no fato de tratar-se de um estudo sobre a formação do professor de um componente curricular que, historicamente, tem demonstrado ineficiência no processo de ensino/aprendizagem.

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Nossa opção por uma investigação qualitativa ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, bem como do problema que se colocava frente ao desafio de um estudo de caso sobre a formação de professores de física em relação à Mecânica Quântica (MQ), no curso de Licenciatura em Física da UFBA. Partimos do pressuposto de que a formação do licenciando em Física ainda na graduação possui falhas ou não é adequada no que se refere ao ensinamento dos fundamentos da MQ, no entanto não há estudos como este que propomos que mostrem por que ela é inadequada. Esta pesquisa se configura como um estudo de caso, em que descrevemos, em particular, os fatos e fenômenos encontrados neste estudo. Justifica-se a opção pelo estudo de caso, visto que sua essência é tentar esclarecer heuristicamente, situações reais vivenciadas por indivíduos em grupos, dentro de um contexto real, onde múltiplas fontes de evidências são expostas, oferecendo informações várias sobre "background" teórico que determina o estudo em questão. Assim sendo, Patton (2002) complementa com:

> *"os estudos de caso são particularmente úteis quando se pretende compreender determinados indivíduos, determinado problema ou uma situação particular, em grande profundidade"* (p. 55)[3].

Neste trabalho, utilizamos os dados da observação direta do tipo não participante, as provas realizadas e as entrevistas estruturadas realizadas com alunos e professor, após o término do curso. Entendemos que qualquer desses instrumentos utilizados na coleta de dados oferece uma leitura interpretativa que não encerra em si uma verdade absoluta. Entretanto, erros interpretativos podem ser minimizados pela variedade desses mesmos instrumentos. É importante acrescentar que o uso de cada um desses instrumentos, contudo, implicava sempre a um retorno às discussões teóricas, cujo desenvolvimento foi feito paralelamente à investigação empírica e às primeiras tentativas de escrever sobre o que o professor dizia ou escrevia e sobre o que o aluno perguntava. O esforço de evitar a simples descrição e buscar a integração entre observação e reflexão teórica e de articular os acontecimentos ali vivenciados tornou-se um movimento concreto, quase palpável, na medida em que circulávamos entre o material empírico e as leituras teóricas.

Escolha da amostra foi norteada pelo número de seis licenciandos do oitavo período, que cursavam a disciplina de Estrutura da matéria I. Levamos em consideração dois critérios básicos para a observação: alunos que participavam das aulas, fazendo perguntas, tirando dúvidas, procurando interagir de alguma forma e os que não participavam ou demonstravam pouco interesse pelos assuntos discutidos. Esses estudantes escolhidos, não apresentaram oposição à sua participação na pesquisa. Por outro lado, o professor que lecionou a disciplina naquele período, quando contatado sobre a possibilidade da realização da pesquisa em sua sala de aula, mostrou-se resistente. Com o

[2] Este trabalho se insere no âmbito de um projeto de tese, representando parte de um dos capítulos já concluído.
[3] Tradução nossa.

passar dos dias e depois de muitas explicações, ele aceitou, mostrando-se disposto a contribuir conosco.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentamos aqui uma breve discussão sobre os resultados obtidos, pautados nas nossas ferramentas de coleta de dados, como: observações em sala de aula do tipo não participante, análises de documentos didáticos e entrevistas estruturadas, que são instrumentos peculiares e indicadores adequados de uma abordagem qualitativa. Esses instrumentos, comparados entre si, são capazes de oferecer uma leitura interpretativa, a fim de que, dessa forma, possamos contemplar, respondendo de forma abrangente, se os nossos objetivos foram ou não atingidos, ou seja, se o processo de formação do licenciando em Física em relação ao ensino de Mecânica Quântica (MQ) é ou não adequado e o seu por quê. No entanto, antes de iniciar essas discussões, é necessário esclarecer que, por questões éticas, resguardaremos o anonimato do professor e dos alunos envolvidos na pesquisa. Nesse sentido, usaremos letras acompanhado de um número, que corresponde à cidade e o aluno observado. Por exemplo: A2S (aluno 2 – Salvador). PS (professor – Salvador).

Estrutura da Matéria I é a única disciplina obrigatória oferecida aos concluintes da Licenciatura em Física, curso noturno, na UFBA, que trata, em parte, da introdução à MQ. Há outras disciplinas optativas que tratam, em seu currículo, dos aspectos da MQ, no entanto, a maioria dos alunos prefere cumprir o restante dos créditos com as disciplinas que dão ênfase à prática de sala de aula e suas metodologias, conforme eles argumentaram após as entrevistas com o pesquisador. Em paralelo, os alunos cursam uma disciplina obrigatória, em laboratório, cujo objetivo é a demonstração de experimentos que versam sobre fenômenos clássicos e híbridos (Espectro de absorção, Espectroscopia Óptica, Efeito Fotoelétrico, Medidas de Campos Magnéticos, Efeito Hall, experimento de Franck-Hertz, Interferômetro de Michelson, Efeito Faraday e Carga Específica do Elétron), totalizando 120 horas-aulas.

A nossa análise foi focada na parte teórica da sala de aula e não houve por nossa parte um acompanhamento aos alunos às aulas experimentais, que ocorreram durante o período da tarde no laboratório, lecionada por outro professor do departamento de Física. Durante as aulas da disciplina Estrutura da Matéria I, houve pouca interação entre a parte teórica e experimental. Por apenas uma vez o professor comentou sobre um dos experimentos realizados no laboratório, referindo-se à determinação experimental da constante de Planck, durante sua aula sobre o efeito fotoelétrico. Infelizmente, o experimento citado pelo professor não foi realizado, pois, segundo os alunos, o mesmo não estava funcionando.

O objetivo dessa disciplina, conforme explicitado pelo Professor, é descrever a matéria com um forte apelo à chamada "velha Mecânica Quântica". Os assuntos contemplados em suas aulas seguiram o roteiro do livro de Caruso & Oguri (2006)[4], começando pelo Atomismo na física, o movimento Browniano, a natureza clássica da luz, eletrólise de Faraday, os raios catódicos, a radiação do corpo negro e os modelos atômicos clássicos, como ele mesmo sinalizou durante sua entrevista:

> *"O eixo central desta disciplina é estudar o modelo desenvolvido para a matéria, no século XIX, ao modo microscópico, envolvendo diversas teorias: a clássica, eletromagnetismo, um pouco de teoria da relatividade restrita e MQ; então ela tá envolvida com diversas teorias da física. Mas, o eixo central é... o que me parece... a estrutura... é uma disciplina... até quanto você pode descrever a matéria no*

[4] F. Caruso & V. Oguri: Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

> *modelo clássico. O problema da crise toda na teoria clássica, tá certo? em descrever a matéria e a radiação, então isso é o que é importante. Muita gente acha que é MQ, mas eu acho que não é MQ. Tem que começar pela teoria cinética dos gases, desenvolver tudo isso até as equações de Schroedinger e algumas aplicações".*

Ao expor os objetivos da disciplina, o professor contempla em parte a sua ementa, uma vez que em sala de aula, o professor reconhece e sugere que os alunos deveriam fazer uma disciplina de introdução à MQ, pois o objetivo desta disciplina (EM I) não chega a um estudo mais profundo da Quântica e nem conceitual, sugerindo a criação de uma nova disciplina para o curso noturno, com esses objetivos. Para o que ele chamou de MQ, o professor destinou em torno de três semanas e uma aula extra, conforme nossas anotações, de todo o conteúdo, destinado, conforme a ementa, a "conhecer a equação de Schroedinger e fazer algumas aplicações". Nas nossas anotações de sala de aula, os assuntos referentes à MQ, foram os seguintes:

- Efeito fotoelétrico e efeito Compton;
- Átomo de Bohr;
- Experimento da dupla fenda com elétrons; onda de matéria de De Broglie;
- A interpretação probabilística de Max Born;
- Princípio da Incerteza;
- Equação de Schrödinger e aplicações (aula extra).

Ao longo das observações realizadas em sala de aula ou na análise de suas provas e entrevistas, constatamos várias discrepâncias, com relação aos assuntos que envolviam conteúdos realmente quânticos. Se por um lado o professor descrevia alguns fenômenos quânticos utilizando ou incorporando elementos clássicos em suas explicações, por sua vez os alunos absorviam tal abordagem, expressando reações de continuidade da Física Clássica, como fruto apenas de uma "ruptura", acrescentando-lhe elementos novos, como por exemplo, o fóton, que tem uma "dualidade" a seu favor, podendo passear por entre essas analogias. Dizia o professor:

- Nunca diga: uma hora ela é partícula, na outra ela é onda; isso tá errado!!!
- A luz, Srs., é o que é; eu não sei o que ela é. A manifestação da onda e da matéria sempre será como quanta;

Nessa aula, o professor desenha no quadro o esboço do que representa o experimento e o gráfico do efeito fotoelétrico, explicando cada etapa do fenômeno em questão. Surgem os seguintes diálogos:

- As pessoas devem entender o que é o quantum de luz; a hipótese é de que a luz é composta por pacotes de energia hf ou fóton de luz, capaz de arrancar elétrons da placa (PS1);
- Quando tiverem oportunidade, voltem ao laboratório para observar essa coisa da função trabalho do material que compõe uma célula fotoelétrica (PS1);
- Há alguma relação entre o quantum de luz e uma quantidade mínima de eletricidade? (A4S);
- Não; essas quantidades são diferentes e não se relacionam (PS1);
- Professor, como uma onda arranca um elétron? (A5S);
- Chacoalhando o elétron com bastante energia. No efeito fotoelétrico, senhores, um fóton é completamente absorvido por um elétron. (PS1).

O professor continua a aula, desenvolvendo a equação referente ao fenômeno discutido, acompanhando a sequência linear do livro citado acima. No entanto, o professor não realiza exercícios com os alunos, o que eles se questionam afirmando que talvez tenha sido isso que gerou o péssimo rendimento na primeira avaliação:

- Talvez isso tenha influenciado nos resultados, comenta (A2S).

- Nem precisa ele resolver, os exercícios já estão resolvidos, comenta (A3S), referindo-se ao livro de exercícios adotado pelo Professor.
- O que eu queria era que ele tirasse as dúvidas, acrescenta (A3S);

Na entrevista, A3S repete o que disse em sala de aula, esclarecendo:

> *"Olha eu resolvi muitos problemas, estavam fáceis e repetitivos no livro de exercícios. Fiz resumos para tentar entender cada assunto, mas não fizemos exercícios conceituais, como você deve ter notado. Eram as questões prontas do livro de exercícios (Caruso & Oguri, 2009)[5]. Tiramos Xerox do livro e era só repetir o que estava ali".*

Em uma das avaliações realizada com a turma, o professor solicitou dos alunos que respondessem a seguinte questão sobre o efeito fotoelétrico:

Questão 2- (2 pontos) Sobre o *"efeito fotoelétrico"* responda as questões a seguir.

a) Qual a hipótese de Einstein para explicá-lo? Escreva a equação básica do modelo de Einstein e o significado de cada termo.

b) Sabendo que num dado metal o comprimento de onda correspondente ao limiar do efeito fotoelétrico é *3.400Å*, determine: (i) a função trabalho (em *eV*), (ii) a energia cinética máxima dos fotoelétrons ejetados por uma luz de comprimento de onda *2.000Å*.

Dos nossos alunos observados, no total de seis, apenas três responderam a proposição (a) da questão acima, denotando uma boa compreensão do fenômeno, desvinculando corretamente a intensidade da radiação incidente com a energia dos elétrons emitidos pelo metal, atribuindo essa liberação a uma determinada frequência dessa radiação, a exemplo do aluno (A2S):

- Einstein concluiu que esta propriedade deveria ter uma dependência com a frequência da luz que incidia no metal e não com a intensidade. Ele observou que como a energia de uma onda eletromagnética depende da frequência, ele sugeriu que a luz deve transportar energia em quantidades bem definidas, que mais tarde foi denominada de quantum de energia.

A aula seguinte foi dedicada a explicar e desenvolver no quadro todo o aparato matemático necessário para o modelo atômico de Bohr. Houve alguns comentários entre professor e alunos a respeito da teoria envolvida, que dizem respeito à inclusão desse assunto no Ensino Médio:

- Esse é um dos poucos assuntos que trabalho em sala de aula... Faço isso na quarta unidade do primeiro ano (A2S);
- Eu também... Só que no final do terceiro ano e para quem quer... (risos)... Poucos vão.(A4S)

O professor corrige algumas distorções conceituais, notadamente no que se refere ao modelo pensado por Bohr, diferentemente do imaginado por Rutherford, causando certo desconforto em alguns dos alunos observados. Observamos que alguns comentários ditos pelo professor durante essa aula, ou não foram compreendidos ou não estavam de acordo com o que alguns alunos estavam esperando ouvir. O professor foi coerente em suas explicações, diferentemente de alguns alunos que continuaram expressando seus pensamentos em função do modelo de Rutherford, gerando algumas confusões a esse respeito. Por outro lado, esperávamos que o professor tivesse aproveitado o momento para enfatizar a diferença conceitual entre o elétron em uma órbita quantizada no modelo semiclássico de Bohr e o elétron em um orbital atômico, no qual o atributo "posição" não está bem definido.

[5] Caruso & Oguri. Física Moderna. Exercícios resolvidos. Ed. Elsevier; Rio de Janeiro, 2009.

Verificamos essas falsas concepções numa das questões da prova, quando eles foram solicitados que respondessem a seguinte questão:

Questão 3 – (2 pontos) Sobre o modelo de Bohr do átomo de hidrogênio, responda:

a) Descreva o modelo e seus postulados.

b) Quais são a energia, momento e comprimento de onda de um fóton emitido pelo átomo de hidrogênio ao fazer uma transição direta de estado excitado com $n=4$ para o estado fundamental?

Em se tratando da questão sobre modelo atômico de Bohr, a maioria dos respondentes associa esse modelo ao de Rutherford, imaginando elétrons como "bolinhas" que giram em torno do núcleo, mantendo suas órbitas definidas, absorvendo ou liberando energia na mudança de órbita e com uma estrutura semelhante ao sistema solar. Vejamos:

- Assemelha-se ao modelo planetário pensado por Rutherford; a diferença é que os elétrons como "bolinhas" passam a ter órbitas definidas. (A1S).

- O modelo do átomo de Bohr foi uma junção do modelo atômico de Rutherford com as ideias de Planck. Rutherford sugeriu que o átomo tinha uma estrutura semelhante ao sistema solar, em decorrência de suas experiências com o bombardeamento de folhas de ouro com partículas alfas. Esse modelo apresentou problemas, no sentido de que ao se movimentar em torno do núcleo, emitindo radiações, o elétron iria colidir com o núcleo, colapsando o átomo. Para Bohr, não deveria haver emissão de radiação, enquanto orbita em torno do núcleo. (A2S).

Essas são premissas bastante arraigadas nas concepções dos alunos, parecem vir ainda do Ensino Médio e foram fortemente reforçadas durante as aulas, no contexto de que a ideia de "bolinha" foi constantemente mencionada por professor e alunos, não só nessa aula, mas também durante o experimento da dupla fenda. Vez ou outra o professor enfatizava que o elétron é uma "bolinha", o que terminou por disseminar entre os alunos uma perspectiva clássica para as partículas microscópicas. Possivelmente, por causa desse reforço na falsa concepção para elétrons, como nos observa Greca *et al.* (2001), muitos dos alunos que cursaram a disciplina de MQ em sua pesquisa, continuaram associando conceitos clássicos a fenômenos quânticos.

Não houve por parte do professor, nenhuma utilização de tecnologias associadas ao ensino. Recursos do tipo áudio visual, experimentos virtuais e outras ferramentas metodológicas não foram usados durante suas aulas, resumindo-se ao ensino tradicional com uso de lápis e quadro branco. O professor parece repetir um modelo de ensino de sua época de graduação no curso de Bacharelado em Física, com aulas predominantes expositivas, inclusive utilizando-se dos mesmos instrumentos classificatórios de avaliação. A ideia de formação de professores é ainda pautada no modelo tradicional, ou seja, na reprodução de conhecimentos cristalizados, prontos.

Na entrevista, ele admite suas limitações para o ensino da disciplina Estrutura da Matéria I para licenciandos, dizendo-se iniciante e angustiado com o rumo que ela poderia tomar. Faz crítica à estrutura da atual disciplina, incentivando os alunos a irem ao departamento de Licenciatura em Física, solicitarem uma disciplina introdutória de MQ, exclusiva para licenciandos, em que a "dualidade" fosse o pilar central desse curso:

- Eu acho que uma abordagem branda sobre MQ, do tipo da dualidade, é o ideal para vocês; essa é a abordagem que vou tentar administrar neste curso, pois essa é a primeira vez que leciono esta disciplina e, portanto, deverá ter um aspecto diferente, mais flexível. Eu não sei, mas talvez seja este o caminho para se inserir Física Moderna no ensino médio (P1S);

Embora tenha demonstrado uma preocupação com aquela disciplina que havia lecionado, tendo em vista que não era uma disciplina própria para os ensinamentos dos fundamentos quânticos, quando teve, no final do curso, a oportunidade de ensinar somente os princípios quânticos, ele não o fez, continuou enfatizando uma essência semi-quântica, apelando fortemente para o aspecto matemático.

Esse procedimento distanciou suas aulas das competências e habilidades sugeridas pelas Diretrizes Curriculares Nacionais, para a formação de professores. Isso ficou notório, por exemplo, quando nas aplicações de autovalores do observável energia, para alguns potenciais particulares (poço infinito, degrau de potencial e barreira de potencial), exigiu-se apenas o raciocínio dedutivo, fazendo com que os alunos decorassem uma sequência de resolução, ao invés de alertar, também, para uma compreensão das bases conceituais decorrentes desses fenômenos analisados e de suas relações com o funcionamento e o uso de equipamentos tecnológicos recentes, a exemplo dos microscópios de tunelamento.

A exemplo disso, o aluno A4S revela, na entrevista, que as suas dificuldades foram com relação aos conceitos e à ferramenta matemática, vejamos:

> *"Olha, os conceitos são assustadores... Né? Sem enfeitar muito o discurso, os conceitos são assustadores. Só não é mais assustador, porque a nível microscópico a gente não vivencia essas coisas por ai, tomando susto em cada esquina. Mas os conhecimentos são abstratos, e muito... Ah... Surpreendentes. No entanto, a dificuldade principal eu acho que é o tratamento matemático. Nosso professor não enfatizou muito na resolução de problemas, pois o tratamento matemático não é trivial e é bem sofisticado; faltaram evidências".*

Durante as aulas sobre a experiência da dupla fenda com a luz, a maioria dos alunos observados admite a existência da difração e da formação de um padrão de interferência. No entanto, quando o professor declarou,durante a aula, que o experimento da dupla fenda já era conhecido deles, e que eles já tinham estudado esse assunto na óptica ondulatória, uma apreensão generalizada tomou conta da turma, entreolhando-se e balançando a cabeça negativamente, em especial os alunos A1S, A5S e A6S. Isso ficou mais fortemente evidente, quando da explicação relativa à difração de fótons ou de elétrons. A maioria não apresentou um bom domínio na interpretação desses fenômenos, em especial quando no experimento era solicitado apenas um fóton por vez. Confuso, o aluno A4S pergunta como isso seria possível, não obtendo uma resposta esclarecedora do professor e nessas circunstâncias, a questão da "dualidade" tornou-se o aporte usado para explicar essas estranhas aparências dos fótons/elétrons, como partícula ou como onda.

- Tudo isso pessoal, é muito estranho! Isso é a dualidade. Os elétrons e demais partículas subatômicas não são nem partículas clássicas e nem ondas clássicas. E como conciliar essa coisa? Isso só foi resolvido com a interpretação probabilística de Max Born (P1S);

Em aulas seguintes, utilizando-se do mesmo experimento, o professor utilizou, como exemplos, balas de uma metralhadora incidindo sobre as fendas e posteriormente elétrons emitidos por uma fonte térmica aquecida. Ao comentar a experiência, o professor não deixa clara a relação entre o diâmetro das balas e as larguras das fendas, gerando dúvidas, que levaram o aluno A2S a perguntar por que não via aquilo acontecendo no dia a dia. Como resposta o professor apenas desenhou no anteparo pontinhos representativo do toque das balas e no outro anteparo os diversos pontinhos brilhantes de elétrons incidentes, com ênfase atrás das fendas. Não houve preocupação em mostrar esses experimentos de outra forma, inclusive não dando ênfase à contribuição do aluno A2S quando sugeriu o uso de dois experimentos virtuais, encontrados na NET, que segundo o aluno mostrava os fenômenos sugeridos pelo professor naquela aula, de forma gráfica, ilustrativa e mais concreta:

- Professor, o Senhor já viu na net um programinha chamado de Dr. Quantum sobre essa experiência? Tem também um experimento virtual usado pela professora Fernanda da UFRGS, dando conta do experimento da dupla fenda com diversas partículas, onde se pode observar nitidamente isso que o Senhor tá dizendo, inclusive usando outras partículas (A2S);
- Já, os resultados ali são muito bons (P1S);

O professor apenas ressaltou que o acúmulo de elétrons no ponto central do anteparo, representava a superposição construtiva, típico de uma interferência quântica e que essa maior intensidade denotava uma maior probabilidade de atuação dos elétrons naquele local, resolvido através da interpretação probabilística de Max Born. Nesse contexto, o professor explica o problema da medida, usando expressões como:

- Se você resolver olhar por onde esse elétron está passando, você irá interferir no sistema e deverá destruir o padrão ondulatório e o elétron será considerado uma partícula; sem olhar o padrão ondulatório será mantido. Na verdade pessoal isso passa a ser chamado, a partir de hoje, de colapso da função de onda. Seria uma forma de você gerar um obstáculo à onda, um bloqueio que se produz e aí você destrói o padrão de onda, tornando-a corpúsculo. (P1S).
- Então professor, esse fenômeno é dual? E se eu olhar estraga o experimento? É isso? (A3S);
- É… se você medir, altera o estado do sistema, ou seja, as franjas de interferências viram bolinhas. Srs. o universo conspira para que isso aconteça (P1S);
- Professor, o elétron se divide nas fendas? Ele sabe que está sendo observado? (A2S);
- Não sabemos o que acontece; a natureza não nos permite verificar. Para Bohr, não faz sentido perguntar por onde o elétron passou (P1S);
- Isso tá mais para bruxaria, Professor (risos) (A3S);

O colapso no ato da medida foi discutido acima, sem que houvesse por parte do professor um esclarecimento sobre esse postulado. Os alunos "aceitaram" passivamente as consequências da medição, demonstrando interesse pelo assunto. Percebemos ainda, que o professor baseou suas explicações na interpretação usada por Bohr, no entanto, ele fez isso não por ter dado um caráter filosófico ao contexto de suas aulas, até porque ele nunca teve contato em sua formação com esses aspectos filosóficos da MQ, como ele mesmo informou na entrevista, mas muito mais por intermédio do livro texto (Eisberg e Resnick[6]), que fundamenta suas informações na interpretação de Copenhague (inclusive reservando uma seção na página 113), para abordar a filosofia da MQ. Notadamente, por duas vezes ao longo do curso, o professor cita Bohr, quando afirma:

- Para Bohr, um fenômeno é ou corpuscular ou ondulatório, mas nunca os dois ao mesmo tempo.
- Para Bohr, não faz sentido perguntar por onde o elétron passou.

Além disso, não houve em nenhum momento do curso, interesse em outras interpretações para os poucos fenômenos quânticos ali abordados.

As aulas seguintes foram dedicadas ao tipo de função destinada a descrever o comportamento ondulatório da matéria, através da equação de Schrödinger dependente do tempo, com intenção de calcular a energia e o estado de um sistema quântico. O professor descreve todo aparato matemático da função de onda, com aplicações de autovalores do observável energia, para alguns potenciais particulares (poço infinito, degrau de potencial e barreira de potencial). Os alunos parecem compreender ou acompanhar o desenvolvimento matemático, no entanto, postos a resolverem e explicarem na prova a questão abaixo, relativa a esses assuntos, não responderam a letra "c", parecendo-nos que não houve uma compreensão satisfatória do formalismo descrito em sala de aula. Vejamos:

[6] Eisberg e Resnick. Física Quântica. Ed. Elsevier, Rio de Janeiro, 1979.

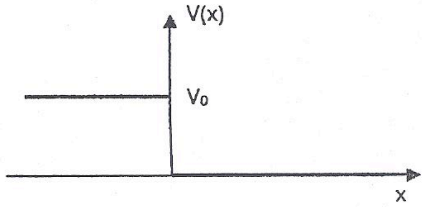
Questão 4 – (3 pontos) A equação de Schrödinger em uma dimensão espacial é dada por:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2}\psi(x,t) + V(x)\psi(x,t)$$

a) Escreva sobre a *"Interpretação probabilística"*.

b) Escreva sobre o *"Princípio de incerteza"*.

c) Obtenha a solução da equação de Schrödinger para os estados estacionários submetida ao potencial dado pelo gráfico ao lado, para o caso em que a energia total da partícula $E<V_0$



Apenas três alunos (A2S, A4S e A5S) responderam as questões (a) e (b) do problema acima. Para a proposição (a), os respondentes identificaram a interpretação probabilística de Max Born, apenas como uma função estatística com o objetivo de quantificar um fenômeno quântico, em oposição ao seu lado teórico que caracteriza as grandezas quânticas não comutáveis. Assim, na proposição (b) quando solicitados a responderem sobre o princípio da incerteza, a maioria não consegue estabelecer diferenças entre os observáveis clássicos e quânticos. Parece não entender que na MQ nem sempre os observáveis são compatíveis entre si, como por exemplo, determinar simultaneamente a posição e o momento linear para um objeto quântico. Apesar de o professor ter descrito coerentemente o princípio da incerteza, mostrando suas equações heurísticas, não houve uma compreensão satisfatória para o que significa esse princípio, uma vez que seus parâmetros (posição e momento, energia e tempo) estão fortemente atrelados aos nossos conceitos clássicos de partículas, reforçados pela quantificação do princípio a partir de dois exemplos (um elétron e um grão de areia) resolvidos no quadro, dando ênfase a impossibilidade de conjecturar esse princípio no mundo macroscópico.

Para a resposta da letra "b" dessa questão, o aluno A2S respondeu:

> *"O princípio da incerteza quer dizer que não podemos determinar com a mesma precisão a posição e o momento de uma partícula. Este princípio é melhor ilustrado no experimento da dupla fenda com elétrons, onde é inserido uma lâmpada entre a barreira com as fendas e o anteparo para poder determinar por qual das fendas o elétron passou. Antes da inserção da lâmpada podemos determinar com boa precisão os momentos dos elétrons que atingem o anteparo, mas a posição é dada por distribuição de probabilidade. Ao inserirmos a lâmpada a posição do elétron passa a ser bem definida, mas o momento passa a ser desconhecido, a figura de interferência no anteparo desaparece."*

A partir da resposta do aluno A2S, fica perceptível que o mesmo ao se referir a simulação observada por ele na NET, facilitou a sua compreensão, inclusive acrescentando à sua resposta um elemento novo (a lâmpada), que não foi abordado em sala de aula, no papel do observador.

Notamos que poucas reflexões foram realizadas e conceitos importantes foram relegados a rápidas informações, às vezes distorcidas ou insatisfatórias, a exemplo do conceito de estado quântico e superposição linear de estados quântico. Quando solicitado a responder sobre o conceito de estado quântico, o professor termina definindo um "observável" clássico, deixando os alunos confusos e sem uma noção de estado e observável quânticos. Vejamos:

- Você sabe definir o estado de um objeto clássico? Então, é a mesma coisa... É... Quando você determina a posição de um objeto dentro da sala, através de sua velocidade, momento, energia, tempo, etc.

Posteriormente, por ocasião da explanação e dedução heurística sobre princípio da incerteza, através de um gráfico de um pacote de onda, o professor volta a ser indagado sobre a definição de estado quântico, dando a seguinte definição:

- É o estado quântico que representa uma partícula localizada em uma região do espaço e representada pela função Ψ (x,t). (P1S);

Quando perguntamos aos alunos, na entrevista, os que eles entendiam por estado quântico, obtivemos as seguintes respostas:

- É um estado bem definido, com níveis bem definidos. (A1S);
- Ainda não sei... Tenho que estudar mais. (A2S);
- Não... Sem chance. Foi um curso mais técnico, sem conceitos, sem teorias e não tivemos incentivo para isso.(A3S);
- Eu não tenho segurança pra falar; não... Não sei exatamente o que é estado quântico. Mas me parece que tem haver com o estado de energia das partículas quânticas, eu acho. (A4S);
- Refere-se a uma função de onda, que na verdade não existe. Seria um pacote de onda onde você tem a probabilidade de ter um elétron ali. Então, estado quântico é uma região onde temos uma probabilidade de encontrar o elétron, sendo que o estado carrega o elétron. (A5S);
- É algo similar ao estado termodinâmico, a partir do qual descrevemos suas propriedades, considerando essa comparação grosseira, ou seja, podemos descrever as propriedades quânticas de um sistema através do seu estado, como posição e momento, por exemplo. Talvez seja isso, assim nessa analogia. (A6S).

Como podemos verificar, faltou um enfoque mais amplo sobre os conceitos de estado quântico e superposição de estados quânticos, mostrando que, assim como ondas clássicas e vetores geométricos, os estados quânticos também podem ser superpostos gerando outros estados quânticos. Notadamente, analisando a tabela acima, o conceito de estado e observável quântico não ficou bem definido, gerando insegurança e falta de informação adequada ao seu conhecimento, com definições voltadas aos conceitos clássicos de sistemas macroscópicos, como por exemplo, o estado termodinâmico.

Em nossas conversas iniciais e informais, o professor nos alertou para uma discrepância existente entre licenciandos e bacharelandos, demonstrando que na formação do professor de Física não lhe é necessário um aprofundamento maior da MQ, apenas uma moderada compreensão da sua ruptura com a Física Clássica (FC). Sentimos ainda em sua declaração que o professor compara os licenciandos do turno da manhã com os do noturno, aprovando que no turno da manhã há uma relação natural e benéfica entre os bacharelados e licenciandos, de tal forma que há um núcleo comum entre os cursos, e que a disciplina Estrutura da Matéria I (EM I) ali ministrada é nivelada "por cima", ou seja, o conhecimento físico que o licenciando deve adquirir, deve se amoldar ao do bacharelado, o que não ocorre no curso noturno.

Esse tipo de pensamento tem sido apontado, como mostramos na nossa revisão de literatura, como um pensamento estagnado, ao tempo em que se tornou um gargalo ou um dos obstáculos à melhoria na formação daqueles futuros professores de Física em relação aos fundamentos da MQ. Quando perguntado sobre quais assuntos, relativo à MQ abordaria no Ensino Médio, a maioria dos alunos observados foi enfática ao afirmar que "não se sentiam seguros", que "foi um curso altamente técnico", que "deveria ser mais teórico", que "foge a realidade dos alunos do Ensino Médio", enfim mostrando-nos que há de fato uma inadequação acentuada, definida em função da formação de licenciandos em física em relação aos fundamentos da MQ.

CONCLUSÃO

A Licenciatura de Física apresenta lacunas e inadequação no que se refere ao ensino dos fundamentos da MQ. Essa inadequação começa com a inclusão de conteúdos clássicos, semiclássicos e quânticos em uma única disciplina que serve como aporte para o entendimento necessário à teoria quântica. Entendemos que esses conteúdos trabalhados na disciplina em questão são essenciais à formação do professor, no sentido de que eles são fundamentais para o desenvolvimento inicial da Física Moderna, e realiza bem o seu papel em difundir a Estrutura da Matéria. No entanto, acrescentar ao final dessa disciplina aspectos superficiais e fragmentados da MQ não produziu bons resultados e de um modo geral a análise dos nossos resultados mostram que, apesar das aceitações dos alunos a dualidade dos fótons e elétrons, a maioria não consegue compreender o seu real significado, contempla o lado clássico dado às partículas e não se apresenta preparada para a inserção desse conteúdo no ensino médio. Além disso, a aplicabilidade desses conteúdos quânticos ocorreu de forma tradicional, com um forte apelo matemático e sem uma discussão conceitual e filosófica de seus fundamentos.

Nessas circunstâncias, acreditamos que para uma formação adequada deve-se apelar não apenas para uma exigência maior sobre a conceituação dos fenômenos quânticos possíveis de ser abordados, mas também para uma mudança na postura do professor formador, aberto à contextualização e à interdisciplinaridade, articulador e facilitador, voltando-se para a utilização de ferramentas metodológicas que ampliem o processo de aprendizagem de seus alunos, tendo sempre em mãos o desenvolvimento das competências e habilidades sugeridas nos documentos oficiais para licenciandos.

REFERÊNCIA

GRECA, I. M & FREIRE, O. Jr. Does an emphasis on the concept of quantum states enhance student´s understanding of Quantum Mechanics? **Science & Education**, v.12, p. 541-557, 2003.

GRECA, I. M; MOREIRA, M. A; HERSCOVITZ, V**.** Uma proposta para o ensino de mecânica quântica**. Revista Brasileira de Ensino de Física**. v.23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

OSTERMANN, F; RICCI, T. S. F. Conceitos de Física quântica na formação de professores: relatos de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física.** v. 22, n. 1, p. 09-35, abr. 2005.

MANNILA, K *et al*. Building a Picture of student´s conceptions of wave and particles-like properties of quantum entities. **European Journal of Physics**, v.23, p. 45-53, 2002.

PATTON, M. Q. **Quantitative research and evaluation methods.**3. ed. California: Sage Publications, Inc; 2002.