

**UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE ESTUDOS RELATIVOS AO ENSINO DA
MECÂNICA QUÂNTICA INTRODUTÓRIA**
(A review of the literature on studies regarding the teaching of introductory quantum
mechanics)

Ileana Maria Greca [ileana@if.ufrgs.br]
Marco Antonio Moreira [moreira@if.ufrgs.br]
Instituto de Física, UFRGS
Caixa Postal 15051,
91501-970, Porto Alegre, RS

Resumo

Neste trabalho apresentamos os resultados de uma revisão da literatura referente ao ensino de conteúdos introdutórios de Mecânica Quântica. Os artigos foram classificados em três grandes grupos -- concepções dos estudantes, críticas à abordagem tradicional e propostas de inovações didáticas -- encontrando-se artigos sobre estes temas em relação às disciplinas introdutórias tanto em nível médio e universitário, como em um curso de formação de professores. É possível observar que a pesquisa sobre este tópico é recente, com um aumento significativo do interesse sobre o mesmo nos últimos anos

Palavras-chave: ensino de Mecânica Quântica; revisão da literatura; pesquisa em ensino de Física

Abstract

In this paper we present the findings of a review of the literature regarding the teaching of introductory Quantum Mechanics. The reviewed papers were classified into three major categories -- student's conceptions, criticisms to the traditional approaches and proposals of pedagogical innovations -- which include studies on introductory quantum topics both at high school and college levels, as well as one study focusing a teacher preparation course. It is possible to note that research on this matter is quite recent, with a significant increase in the last few years.

Key-words: teaching of quantum mechanics; review of the literature; research in physics education.

1. Introdução

O sucesso alcançado pela Mecânica Quântica medido, tanto pela variedade de fenômenos que descreve e prediz, como pelos seus impressionantes efeitos sobre a tecnologia moderna, torna recomendável seu estudo em diversas áreas e, ademais, que isto ocorra cada vez mais cedo. Porém, a questão do ensino de Mecânica Quântica, tanto no que se refere às dificuldades para a aprendizagem de seus fundamentos quanto ao desenvolvimento de estratégias didáticas visando facilitar este processo é um tema de pesquisa relativamente recente na área de Ensino de Ciências (McDermott & Redish, 1999), embora o número de artigos sobre o tema tenha crescido nos últimos anos. Por isto, consideramos oportuna uma revisão da literatura a respeito desse assunto, sendo este o objetivo do presente trabalho.

Consultamos, a partir de 1970, as seguintes revistas: *International Journal of Science Education*, *Journal of Research on Science Teaching*, *European Journal of Science Education*, *Science Education*, *American Journal of Physics*, *Contemporary Physics*, *Physics Teacher*, *Physics Education*, *Cognition and Instruction*, *Learning and Instruction*, *Enseñanza de las Ciencias*, *Revista de Enseñanza de la Física*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* e *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Além disto foram também utilizados o sistema ERIC (Educational Resources Information Center) -- o mais importante sistema de informações na área de educação -- e as bases de dados disponíveis na rede WEBOFSCIENCE e PROQUEST 5000.

Os artigos encontrados¹ podem ser classificados em três grupos: *artigos sobre concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de Mecânica Quântica*, *trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica* e *estudos contendo propostas de novas estratégias didáticas*. Os do primeiro grupo são escassos e aparecem principalmente em revistas da área de Ensino de Ciências. Os trabalhos do segundo grupo estão centrados fundamentalmente nos cursos introdutórios sobre o tema, tanto em nível médio como universitário. Entre os artigos do terceiro grupo encontram-se propostas de inclusão de tópicos específicos, de mudança de enfoque, de alterações curriculares e de inclusão de novas tecnologias (sobretudo de recursos computacionais). Tais propostas, poucas delas efetivamente implementadas e avaliadas, se referem a conteúdos introdutórios em nível médio e universitário, assim como a cursos de formação de professores.

A classificação dos artigos em grupos aqui proposta não é, obviamente, a única possível e alguns artigos podem inserir-se em mais de uma categoria. Cabe aclarar que os dados que apresentamos são os que aparecem nos artigos, faltando em alguns casos, nos próprios artigos, maiores informações. Não fizemos nenhuma reinterpretação das concepções dos estudantes sobre conceitos quânticos apresentadas pelos autores em cada artigo, supondo que elas correspondem às conceptualizações dos pesquisadores sobre as mesmas. Esclarecemos ainda que não faz parte dos objetivos deste trabalho uma análise crítica da literatura que aqui revisamos.

2. Concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de Mecânica Quântica

As pesquisas mais sistemáticas sobre concepções dos estudantes nessa área têm sido realizadas pelos grupos de pesquisa da Universidade de Bremen e da Universidade Livre de Berlim na Alemanha. Niedderer (1987, p.345) relata que estudantes do último ano da escola secundária alemã (18-19 anos), depois de aulas sobre física atômica quântica, usam basicamente três estratégias para entender o conceito de dualidade onda-partícula aplicado aos elétrons. A primeira delas é considerar que os elétrons são partículas que se movimentam em linha reta, sendo as observações de distribuições de elétrons explicadas pelas colisões entre eles. A segunda estratégia é pensar nos elétrons ainda como partículas com massa, velocidade e órbita, mas movimentando-se numa onda. Segundo os autores, para os estudantes o elétron seria algo assim como o oscilador da onda. Por último, um número reduzido dos estudantes entende os elétrons a partir de uma concepção ondulatória formal. Niedderer, Bethge e Cassens (1990, apud. Mashhadi, 1994, p. 256) apresentam os seguintes resultados de pesquisas realizadas também com estudantes do último ano do ensino médio. Estes estudantes:

¹ Não foram incluídos artigos publicados em revistas de áreas correlatas, como a de Química, pois, ainda que alguns deles tratem de conteúdos de Mecânica Quântica são bastante específicos da área.

- i) possuem uma imagem concreta do átomo;
- ii) tendem a usar os conceitos de movimento e de trajetória nas suas próprias explicações sobre as propriedades do átomo -- para eles, movimento e trajetória são contínuos e, no caso da trajetória, esta é definida como um caminho ;
- iii) tendem a usar os conceitos de conservação de energia e de massa nas suas explicações -- a existência de níveis discretos de energia não é explicada, senão que é usada como base para outras explicações ;
- iv) tendem a usar o conceito de probabilidade para expressar que alguma coisa não se conhece exatamente.

Fischler e Lichtfeldt (1992, p. 187) encontraram as seguintes concepções sobre a estabilidade do átomo em um estudo realizado com 240 estudantes de cursos básicos e intensivos novamente do último nível do ensino secundário alemão:

- i) Círculo (órbita circular) -- Os elétrons voam ao redor do núcleo em alta velocidade em órbitas fixas. A força centrífuga e a força coulombiana estão em equilíbrio (63% dos estudantes)
- ii) Carga -- Os estudantes utilizam suas concepções sobre repulsão entre cargas para explicar a distância entre o próton e o elétron (23% dos estudantes).
- iii) Camada -- Os elétrons encontram-se, fixos ou movimentando-se, em uma casca firme (8% dos estudantes).

Após uma intervenção didática de cinco semanas, que será relatada quando descrevermos os artigos contendo estratégias didáticas, apareceu a seguinte nova concepção.

- iv) Localização de energia -- A estabilidade dos átomos se encontra vinculada ao Princípio de Incerteza. De acordo com esta concepção, a restrição no espaço resulta num aumento da energia cinética dos elétrons, cuja localização está sujeita a uma distribuição estatística. Para estes estudantes, ainda resulta sem sentido falar sobre elétrons individuais (68% do grupo experimental - 96 estudantes).

Petri e Niedderer (1998) fizeram um estudo de caso seguindo o processo de aprendizagem de um estudante durante o mesmo conteúdo de física atômica pesquisado anteriormente por Niedderer, visando investigar o sistema cognitivo do estudante de modo a que permitisse gerar um modelo para descrever, analisar e explicar sua forma de pensar e aprender na interação com a situação de ensino. A disciplina, com duração aproximada de 80 aulas, implementava a proposta didática que aparece em Fischler e Lichtfeldt (1992). A concepção inicial do estudante correspondia ao modelo planetário -- o elétron como uma pequena bola, movimentando-se em órbitas circulares ao redor do núcleo. Depois de cinco semanas de aulas, onde tinham sido apresentados fenômenos quânticos com elétrons livres incluindo o efeito fotoelétrico, a difração de elétrons e o Princípio de Incerteza, assim como a noção de que durante o processo de localização a posição do elétron é produzida -- ou seja, não é fixa de antemão --, introduzindo assim a idéia de probabilidade de localização, o estudante desenvolveu um modelo atômico onde as órbitas eram determinadas pelos valores máximos da função densidade de probabilidade, mas no qual estas órbitas não eram exatas devido ao Princípio de Incerteza. Ou seja, o átomo se encontrava rodeado de elétrons, que continuavam a ser partículas clássicas, em uma nova classe de órbitas, não definidas, determinadas pela função densidade de probabilidade. Os pesquisadores (op. cit., p. 1081) argumentam que, até certo ponto, o resultado do aprendizado é independente da abordagem instrucional, pois esta segunda

concepção que o estudante desenvolveu é similar às encontradas nas abordagens tradicionais. Na terceira concepção, desenvolvida durante a quinta e oitava semanas, o estudante deixa de pensar no elétron como partícula com órbitas, passando a falar do estado do elétron, em que o núcleo atômico é rodeado por um campo de possibilidades, que tem o perfil determinado pela função de onda e que emana do núcleo em todas as direções. Este campo porém não é real e, dentro dele, se encontra o "estado do elétron". Uma vez que o elétron é localizado -- situação em que recém o elétron passa a ser real -- não se move mais dessa posição. Nas últimas semanas, depois de trabalhar com um "software" que permitia calcular configurações eletrônicas de átomos mais pesados que o hidrogênio, o estudante passou a desenvolver o modelo de "nuvem eletrônica". Em uma entrevista realizada três meses após a instrução, o estudante ainda mantinha elementos das quatro concepções desenvolvidas. Nesta entrevista, também, ficou evidente que ainda sustentava uma visão determinista do mundo.

Mashhadi (1996, p. 258-261) consegue distinguir as seguintes imagens sobre o átomo utilizadas por estudantes ingleses do último nível da escola secundária (N=57, sendo N o tamanho da amostra), onde são introduzidos estes tópicos, ainda que em forma um pouco menos aprofundada do que no caso das escolas alemãs (por exemplo, o Princípio de Incerteza não está incluído nas súmulas).

- i) Imagem mecanicista -- Os elétrons se movimentam muito rapidamente em órbitas definidas, resultantes do balanço entre a velocidade dos elétrons e a força eletrostática de atração entre elétron e núcleo (25% dos estudantes).
- ii) Imagem probabilística -- Os estudantes falam em nuvens de elétrons, mas continuam a considerá-los como partículas (25% dos estudantes).
- iii) Imagem de movimento "aleatório" -- Combinação das imagens anteriores, indica que os elétrons se movimentam aleatoriamente em regiões definidas ou em diferentes órbitas energéticas (23% dos estudantes).
- iv) Imagem de "nuvem de carga" -- os elétrons não ocupam uma posição definida, senão que se "espalham" ao redor da sua órbita (10% dos estudantes).

Uma porcentagem muito pequena (ao redor de 4 %) dos alunos considera que a visualização não é possível.

No fenômeno da difração, por sua vez, os elétrons são visualizados como partículas clássicas (30%), como ondas (cerca do 60%), como "onda de probabilidade" (4%) e como "nuvem de carga" (4%). Um número bem pequeno de estudantes argumenta que a visualização dos elétrons não é nem possível nem desejável.

Unal e Zollman (2001) fizeram também um estudo tentando determinar as idéias de estudantes americanos de nível médio sobre o átomo, analisando as respostas escritas destes estudantes quando solicitados a descrevê-lo. Esta análise foi realizada desde uma perspectiva fenomenográfica com as respostas de 239 estudantes, que na época já haviam cursado ou estavam cursando disciplinas de Física. Foram detectadas seis categorias primárias, três das quais são genéricas: Não responde, Não sei, Outra. As outras três, que aparecem hierarquicamente apresentadas em ordem crescente de compreensão conceitual, foram denominadas de *unidade de matéria* (os estudantes definem o átomo como elemento

constituente da matéria); *constituintes do átomo* (neste caso os estudantes enunciam os elementos que conformam o átomo e eventualmente sua localização) e *modelo de átomo* (quando o estudante utiliza na sua descrição algum modelo atômico). Combinações entre estas categorias também foram estruturadas hierarquicamente. Os resultados mostram que nenhuma das categorias ou combinação delas excede 25% dos estudantes, sendo que mais da metade incluiu a categoria de unidade da matéria nas suas respostas (que é a categoria considerada pelos autores como a de menor nível de compreensão), frente a 33% dos estudantes que mencionaram alguma coisa acerca dos constituintes do átomo e a 42% dos estudantes que fizeram algum tipo de referência a modelos atômicos. Destes últimos, a maioria utilizou modelos mecanicistas, sendo que somente 3% deles fez menção a algum conceito quântico.

Em uma linha de pesquisa diferente das anteriores, Gil & Solbes (1993, p. 256) procuraram detectar se os estudantes percebiam as diferenças entre o paradigma da Física Clássica e o da Física Moderna e qual a influência disto na compreensão de conceitos-chave do novo paradigma. Para isto aplicaram um questionário a 536 estudantes espanhóis dos últimos anos do ensino médio (16-18 anos). Os resultados mostram que como consequência de uma apresentação muito simplista dos tópicos de Física Moderna neste nível de instrução, em particular nos livros de texto que tratam sobre o tema (Solbes et al. 1987), grande parte dos estudantes (entre 85 e 93%) ignora a existência de crises no desenvolvimento da Física Clássica, não sendo capazes de mencionar um só problema associado a estas crises assim como tampouco assinalar alguma diferença entre a Física Clássica e a Física Moderna. Como consequência, os alunos apresentam, também, sérias dificuldades para a compreensão de temas fundamentais, como a dualidade onda-partícula, pois sequer chegam a entender que estão em um marco conceitual diferente.

As pesquisas sobre as concepções que estudantes de nível universitário têm sobre conteúdos em Mecânica Quântica são mais recentes e também mais escassas. Johnston, Crawford e Fletcher (1998) apresentam resultados obtidos em uma disciplina do terceiro ano da graduação em Física (N= 33) da Universidade de Sydney, na Austrália, com estudantes que já tinham cursado disciplinas anteriores com conteúdos sobre Mecânica Quântica. No referido estudo se procurava detectar os modelos mentais usados pelos estudantes para a compreensão de um determinado tópico. (Os estudantes foram divididos em dois grupos -- um no qual os conteúdos foram ministrados segundo uma abordagem mais formal e o outro com um enfoque mais experimental. Os resultados finais não mostraram diferenças entre eles). As respostas aos questionários, aplicados antes e depois da instrução, fundamentalmente as referidas à dualidade onda-partícula, às concepções que os estudantes têm sobre onda e partícula e sobre a diferença entre incerteza e indeterminação – todas elas no contexto da Mecânica Quântica – foram analisadas segundo dois métodos: uma análise fenomenográfica², que visava categorizar as respostas em grupos qualitativamente diferentes e uma análise de quanto corretas estas respostas estavam. Como resultado da primeira análise encontrou-se que as respostas sobre partículas e sobre ondas podem ser agrupadas em três níveis hierárquicos. Sobre partícula, os níveis podem ser caracterizados como: a partícula é feita de matéria (4%); a partícula é feita de matéria e percorre trajetórias definidas (63%); a partícula, além das propriedades anteriores, responde a forças (33%). Sobre ondas, os níveis podem ser caracterizados como: as ondas possuem propriedades simples; as ondas difratam e interferem; as ondas, além das propriedades

² A fenomenografia é o estudo empírico das distintas formas em que as pessoas experimentam, percebem, apreendem, compreendem ou conceituam vários fenômenos ou aspectos no mundo. As diferenças são categorizadas em termos de "categorias de descrição" logicamente relacionadas entre elas e hierarquizadas segundo um determinado critério (Marton, 1997).

anteriores, transferem energia. Sobre a questão referente a diferenças entre indeterminação e incerteza, os autores indicam que foi impossível estabelecer qualquer categoria, pois as respostas dadas eram completamente fragmentadas. As médias obtidas pelos estudantes nestas respostas (medidas pelo número de atributos considerados apropriados no contexto da Mecânica Quântica) foram de 1,6 pontos para as respostas sobre partículas, 1,3 pontos para as respostas sobre ondas e 1,7 pontos para as respostas sobre indeterminação-incerteza, cada uma delas em relação a um total de 6 pontos. Os autores destacam que os estudantes utilizaram uma "terminologia quântica", ou seja utilizaram termos como princípio de incerteza, dualidade, probabilidade, que não tinha relação com as perguntas. Estas evidências indicariam que o conhecimento que esses estudantes têm sobre Mecânica Quântica (todos eles considerados bons estudantes segundo os critérios usuais dos departamentos de Física) é muito superficial, não passando de uma coleção de fatos isolados, úteis para a aprovação nos cursos. Possivelmente isto explique a afirmação característica destes estudantes que consideraram a Mecânica Quântica difícil, pois "é tudo matemática". Ou seja, para eles muitos dos elementos necessários para compreendê-la "não passam de deduções isoladas apoiando-se precariamente umas nas outras" (p.443). Os autores destacam também que os mesmos questionários foram ministrados informalmente a estudantes de cursos superiores e de pós-graduação, e que as respostas não foram muito diferentes das encontradas no grupo pesquisado. Ainda que considerem que outras pesquisas mais cuidadosas devam ser feitas a este respeito, isto poderia estar indicando, segundo eles, que se os conceitos fundamentais não são compreendidos nos cursos iniciais, o processo de mudança posterior destes conceitos se torna muito lento. Como continuação deste trabalho, Fletcher & Johnston (1999) elaboraram um questionário com quatro questões sobre Efeito Fotoelétrico, Princípio de Incerteza, natureza das ondas e natureza dos níveis de energia, ministrado a 231 estudantes de curso de Física da Universidade de Sydney que tinham cursado conteúdos de Mecânica Quântica em uma disciplina anual. Usando as mesmas técnicas de análises que no estudo anterior, os autores encontraram que os estudantes têm sérias dificuldades para associar os novos conceitos com experiências cotidianas, parecendo que estes conceitos são aprendidos fora de contexto. Por exemplo, no caso do Princípio de Incerteza, os estudantes não o reconhecem como um novo conceito senão que o interpretam a partir de seu conhecimento anterior, simplesmente transferindo este conhecimento para o mundo microscópico. Resultados semelhantes foram encontrados a respeito dos níveis de energia, onde os estudantes mantiveram modelos aprendidos durante a escola secundária, como os modelos atômicos de órbitas e camadas.

Bao, Jolly & Redish (1996) desenvolveram uma pesquisa com estudantes do terceiro semestre de um curso introdutório de Física para Engenharia (de três semestres de duração) -- na modalidade Cálculo³ – da Universidade de Maryland, EUA. Neste tipo de curso os conteúdos de Mecânica Quântica são ministrados nas últimas cinco semanas do semestre. O material analisado consistiu nas respostas dos pré e pós-testes aplicados, em observações dos estudantes durante as atividades de laboratório e grupais e em entrevistas individuais nas quais os estudantes deviam resolver problemas oralmente. Os resultados do pré-teste mostraram que a maioria dos estudantes pesquisados não possui qualquer conhecimento prévio sobre probabilidades e tem muitas dificuldades para interpretar os diagramas de energia potencial, estabelecendo frequentemente relações incorretas a respeito dos sistemas físicos que estes diagramas representam. Sobre os resultados depois da instrução, os autores destacam as respostas dadas a um problema em particular, onde aparecem desenhados três potenciais retangulares de diferentes profundidades, nos quais estavam indicados os níveis de energia. Abaixo destes diagramas estavam desenhadas duas funções de onda (uma simétrica e outra

³ Nos EUA os cursos universitários de Física Geral podem ter duas modalidades, com Cálculo e sem Cálculo.

antissimétrica). Solicitava-se aos estudantes que indicassem a que níveis de energia corresponderiam estas funções e onde seria mais provável achar o elétron em cada caso. Menos de 2% dos estudantes deu uma resposta correta, 40% não respondeu, 36% usou os níveis de energia para descrever a posição e 22% apresentou respostas que nada tinham a ver com o solicitado. Estes resultados parecem indicar que os estudantes tendem a interpretar os poços de potencial em uma dimensão como poços gravitacionais bidimensionais. (Pense-se nas similitudes entre os diagramas usuais para representar os poços de potencial e os poços gravitacionais bidimensionais). No semestre seguinte, utilizando material especialmente preparado sobre probabilidades e poços de potencial, o número de respostas corretas aumentou significativamente (81%), porém entrevistas com estes estudantes mostraram que ainda continuavam a apresentar dificuldades para explicar corretamente suas respostas.

Embora não decorrentes de uma pesquisa sistemática sobre o assunto, Styer (1996) lista uma série de concepções erradas que, segundo ele, são usuais em estudantes, professores e textos. Entre estas, que os autoestados de energia são os únicos estados permitidos; que o estado quântico $y(x)$ fica completamente definido pela sua densidade de probabilidade associada $\frac{1}{2} y(x)^2$; que a função de onda $y(x)$ é uma função do espaço de posição tridimensional; que a função de onda (ou vetor de estado) descreve um "ensemble" de sistemas clássicos; que a função de onda descreve um único sistema promediado sobre certo intervalo de tempo; que o colapso do pacote de onda envolve (ou permite) comunicação ultraluminar; que o processo de medida perturba o sistema; que se um sistema tem um momento angular definido, por exemplo na direção z , os momentos angulares em outras direções perpendiculares também têm um valor definido, porém como eles mudam rapidamente (ou aleatoriamente) quando uma medição de momento angular é feita sobre o sistema, o resultado da mesma não pode ser predito com absoluta certeza; que uma barreira muito afastada de uma partícula, onde $y(x) = 0$, pode afetar a partícula.

O grupo de pesquisa em ensino de Física da Universidade do Estado de Ohio, EUA, (Aubrecht, Kassebaum, May & Stith, 1999) desenvolveu um instrumento para identificar preconceções acerca dos conceitos de quantização e de fóton. O instrumento, construído a partir de entrevistas com 73 sujeitos (físicos, professores do ensino médio, estudantes de pós-graduação, estudantes de graduação e estudantes do ensino médio) consiste em um teste com quatro itens de múltipla escolha e 42 itens do tipo Lickert⁴, incluindo a opção "não sei". A primeira aplicação do teste a 69 estudantes de Engenharia mostrou que muitos deles já tinham ouvido a palavra fóton (ainda que poucos tivessem uma clara imagem sobre o mesmo) mas muito poucos tinham conhecimento da palavra quantização. Uma segunda aplicação do teste a 272 estudantes de cursos de Engenharia e de cursos não científicos da Universidade de Ohio, bem como estudantes de cursos técnicos da Universidade de Cincinnati, identificou as concepções sobre fótons relacionadas a seguir.

i) Fótons e luz são a mesma coisa.

ii) A luz é feita de fótons, ou fótons são os únicos componentes da luz. Junto com esta concepção aparecem as idéias de que a luz é feita de um número grande de fótons que deixam a fonte luminosa simultaneamente e que ver fótons é o que faz ver luz.

iii) Os fótons são feitos de luz, são feitos de partículas de luz ou podem carregar luz.

⁴ Os itens do tipo Lickert (1976) são constituídos por afirmações com as quais o sujeito deve expressar o seu grau de concordância ou discordância em uma escala pré-determinada.

iv) A luz produz os fótons.

v) Os fótons produzem ou emitem luz, ou alguma coisa que pode ser vista.

Ambrose, Shaffer, Steimberg & McDermott (1999) desenvolveram uma pesquisa na Universidade de Washington, EUA, sobre a compreensão dos estudantes em ótica física. Nas entrevistas realizadas com 16 estudantes de um curso de Física Moderna e 14 estudantes de um curso de Mecânica Quântica, se lhes solicitava justificar suas previsões sobre experiências em que um raio de luz incidia em um anteparo com uma ou duas fendas (difração e interferência). Foram, neste contexto, detectadas as seguintes concepções sobre fótons.

i) Movimentam-se em linhas retas, que se "curvam" perto das fendas.

ii) Movem-se ao longo de caminhos senoidais.

iii) Dois ou mais fótons são necessários para observar padrões de interferência, ou seja, luz de intensidade muito baixa não produzirá este padrão, ainda que incida durante um período prolongado de tempo.

Estas idéias incorretas sobre os fótons eram transferidas, ademais, para os elétrons.

A partir destas entrevistas os pesquisadores elaboraram um questionário com duas questões, semelhantes às das entrevistas, embora com elétrons, aplicado a 80 estudantes de Física Moderna e a 40 estudantes de Mecânica Quântica. Os resultados mostram que:

i) 75% dos estudantes não reconhece que o comprimento de onda de De Broglie não é uma propriedade inerente a cada elétron, senão que varia com sua velocidade;

ii) 40% dos estudantes considera que os efeitos de difração e interferência são independentes da velocidade;

iii) 20% dos estudantes aplicou fórmulas válidas para o comprimento de onda da luz para o comprimento de onda de De Broglie dos elétrons, aparentemente mostrando que a falta de compreensão das propriedades ondulatórias da matéria leva a uma simples memorização de fórmulas sem conexão.

Este mesmo grupo desenvolveu uma pesquisa posterior centrada no conceito de comprimento de onda de De Broglie (Vokos et al, 2000), no entendimento de que este é um conceito chave para a passagem ao estudo formal da Física Quântica. Este estudo esteve centrado em determinar as dificuldades de estudantes universitários com este conceito no contexto em que aparece por primeira vez, i. é, nos fenômenos de difração e interferência de partículas. Para isto foram ministrados problemas escritos a 450 estudantes da Universidade de Washington, que cursavam disciplinas de Física em diferentes modalidades e nível de aprofundamento. Também foram entrevistados 14 estudantes que cursavam uma terceira disciplina sobre conteúdos de Mecânica Quântica. As questões, centradas nos fenômenos de difração e interferência de elétrons, eram de dois tipos: as denominadas de tipo S em que os estudantes eram questionados acerca dos efeitos sobre os padrões de difração ou interferência observados, quando se variava a separação entre as fendas ou sua largura, e as do tipo P, onde

os estudantes deviam mostrar sua compreensão em relação aos fatores que influenciam o comprimento de onda de De Broglie das partículas incidentes.

Em relação às perguntas do tipo S, as dificuldades encontradas foram semelhantes às do estudo anterior: muitos estudantes apresentavam respostas corretas, mas explicações erradas; a maioria dos que utilizavam formulações matemáticas nas suas argumentações não as aplicavam corretamente (por exemplo, utilizavam a fórmula para o cálculo do máximo em um padrão de interferência para referir-se ao mínimo em um padrão de difração); aqueles que não utilizavam fórmulas raramente explicavam os padrões de difração ou interferência com base nas diferenças entre os caminhos. Em relação às questões do tipo P, muitos dos estudantes não reconheceram a relevância do comprimento de onda de De Broglie para o tipo de padrões que seriam obtidos (ou seja, não reconheciam que mudanças na velocidade ou na massa das partículas incidentes afetaria a localização de máximos ou mínimos); alguns que levaram em consideração esta questão, consideraram que o comprimento de onda era uma propriedade fixa da partícula, não conseguindo associar o comprimento de onda de De Broglie com o momentum; muitos também aplicaram erradamente as fórmulas (fórmulas válidas para o comprimento de onda da luz para o comprimento de onda de De Broglie dos elétrons) tratando de forma indiferenciada partículas com e sem massa.

- ? Os artigos desta categoria mostram que as pesquisas sobre as formas em que os estudantes percebem os fenômenos descritos pela Mecânica Quântica ou sobre como entendem seus conceitos estão apenas começando a aparecer. Os tópicos tratados ainda são poucos (como a estabilidade do átomo, o comprimento de onda de De Broglie, a dualidade onda-partícula, Princípio de Incerteza, quantização, fótons e elétrons) deixando de lado questões importantes como a da superposição de estados, ou o problema da medida.
- ? A metodologia de pesquisa mais utilizada tem sido a de questionários contendo perguntas abertas ou de múltipla escolha, ou questões conceituais. Os resultados, por sua vez, parecem mostrar que os distintos conceitos quânticos abordados dificilmente são compreendidos pelos estudantes pesquisados, estudantes estes, ademais, pertencentes a distintos níveis e modalidades e também a diferentes comunidades. Uma questão que nos parece surgir destas pesquisas, em particular das realizadas com estudantes universitários, é que se as questões fundamentais, os conceitos centrais da Mecânica Quântica, não são discutidos explicitamente nos cursos introdutórios, cursos mais avançados parecem conseguir apenas que poucas das dificuldades iniciais sejam superadas.

3. Críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica

Os artigos deste conjunto são unânimes na crítica à forma "ineficiente" em que os conteúdos de Mecânica Quântica são apresentados, mas não apresentam a mesma unanimidade nos aspectos centrais dessa crítica. Vários deles criticam a abordagem formal que caracteriza muitos destes cursos. Por exemplo, Redish & Steimberg (1998), da Universidade de Maryland, consideram que o problema maior dos cursos introdutórios, para os estudantes de carreiras científicas, é justamente o enfoque axiomático dado aos mesmos. Este enfoque "obscurificaria" a importância que a Mecânica Quântica tem para o mundo real, fazendo com que os estudantes

destas carreiras considerem o assunto como de interesse exclusivo dos físicos teóricos e impedindo, desta forma, que ditos estudantes se aprofundem na descrição do mundo microscópico. Esta questão, segundo eles, deve ser superada o mais rápido possível, dada a importância que a tecnologia quântica vem adquirindo nos últimos anos. Da mesma opinião é Barton (1997, p. 429), que aponta, ademais, as deficiências dos livros de texto usuais (tanto os de nível introdutório como os mais avançados) que *"fornecem esplêndidos métodos para realizar qualquer cálculo sobre átomos ou sobre campos quantizados, mas no que se refere a princípios e interpretação da Mecânica Quântica em si, são, quase sem exceção, simplistas e obscuros ao mesmo tempo..."*. Story (1998, p. 54) considera que a abordagem formal, ainda que possibilite aos estudantes aplicar rapidamente a Mecânica Quântica, cria uma barreira para a compreensão, pois *"muitos dos conceitos fundamentais (amplitude de probabilidade, operadores representando observáveis como energia e momentum, o conceito global do que um "estado" é, etc) pareceriam surgir magicamente..."*

Outros artigos criticam as abordagens que tentam estabelecer elos com a Física Clássica, ora através da utilização de analogias ondulatórias, ora a partir do uso de uma reconstrução histórica "sui generis" do processo que levou à criação da Mecânica Quântica. A tentativa de amarrar os conceitos quânticos aos conceitos clássicos que os estudantes já conhecem, como é o caso da introdução da equação de Schrödinger em analogia com as ondas mecânicas em cordas vibrantes é criticada fortemente por Rüdinger (1976), pois dificultaria a compreensão da superposição de estados. García-Castañeda (1985) também critica a utilização exclusiva de características ondulatórias para descrever as características dos sistemas quânticos. Segundo Nussenzveig (1998, p.v) desenvolver a mecânica ondulatória favorece *"a ilusão de que basta estender um pouco as idéias sobre ondas clássicas"* para entender os princípios quânticos.

Fischler & Lichtfeldt (1992) argumentam que muitos destes cursos dedicam uma boa parte do tempo em apresentar a antiga Mecânica Quântica, em particular o modelo atômico de Bohr. Consideram que isto não é apropriado pois este enfoque histórico sobredimensiona as concepções da Física Clássica, agregando às dificuldades de compreensão, inerentes à própria descrição quântica, o uso de modelos mecanicistas como um obstáculo a mais a ser superado. Segundo Jones (1991, p. 93) os estudantes não passam da Mecânica Clássica à Quântica, senão que são obrigados a aprender *"um híbrido, composto basicamente por idéias e imagens desenvolvidas no período de 1900-1920... que produz modelos conceituais incorretos, retardando a compreensão e o interesse"*. Segundo ele, isto se deve a que a Física Moderna é ensinada desde uma perspectiva histórica, em vez de lógica, como aconteceria em outras áreas da Física. Em particular, mostra como a introdução do assunto via o efeito fotoelétrico leva, quase inevitavelmente, a imagens incorretas sobre a luz. Destaca que este conceito que parece ser tão vital para a compreensão da Mecânica Quântica nos cursos introdutórios, poucas vezes aparece em cursos mais avançados e que *"quanto mais avançado é o texto, mais tarde ele aparece"*. De opinião semelhante no que diz às dificuldades que o conceito de fóton apresenta, Strnad (1986) considera que a maioria dos livros de texto introdutórios (p. 650) *"contém afirmações sobre os fótons que se não são falsas, pelo menos podem induzir a erros"*. Segundo ele, o conceito de fóton deve ser introduzido como quantum de energia, evitando tanto de falar em posição dos mesmos como de estabelecer analogias com os elétrons.

Dado que a abordagem "histórica" tem um peso muito grande na tradição de ensino dos tópicos introdutórios em Mecânica Quântica (praticamente todos os livros de texto introduzem o postulado da quantização da energia apresentando numerosos fatos experimentais descobertos

no início do século XX que soam inexplicáveis sem a hipótese da quantização) diferentemente do que acontece em outras áreas da Física, como a Mecânica ou o Eletromagnetismo, apresentamos a seguir as idéias expostas em artigo por Kragh (1992) em que este ponto é analisado. Kragh indica que há, pelo menos, duas razões importantes para a introdução da perspectiva histórica no ensino de ciências: o impacto da ciência não pode ser entendido sem a compreensão das mudanças pelas quais passou ao longo da história, assim como é impossível entender o que a ciência é e como avança o conhecimento científico sem a dimensão histórica do processo, ainda que, muitas vezes, a motivação para a utilização da perspectiva histórica seja a de "abrandar" as ciências duras, assemelhando-as às humanistas. Nesse sentido, (p.350), *"por razões práticas, não é possível (nem desejável) ensinar um tópico científico exclusivamente através de uma perspectiva histórica"*. Há, também, outra razão pela qual aparecem conteúdos históricos nas súmulas de certas disciplinas científicas ou nos livros de ciências: a doutrinação em certos pontos de vistas metodológicos e didáticos. Para isto, a história é reconstruída de forma (p. 351) *"a convencer os estudantes de que a conclusão à qual chegaram os físicos no passado é a única racional e a única que os estudantes modernos devem aceitar"*. Esta história mítica é o que se denomina de quase-história. Um exemplo ilustrativo deste ponto é o caso das Introduções à Mecânica Quântica. Em particular, Kragh discute extensamente a história do efeito fotoelétrico, mostrando como a versão quase-histórica está grosseiramente simplificada, contendo numerosos mitos e erros. Entre eles (p. 352) :

- i) a teoria de Einstein de 1905 se assentava e era uma continuação natural da teoria de Planck de 1900, adotada por Einstein e aplicada à natureza da luz;
- ii) o trabalho de Einstein era uma teoria sobre o efeito fotoelétrico;
- iii) o ponto central da teoria seria a explicação de uma série de experimentos que mostravam que a energia cinética dos fotoelétrons variava linearmente com a frequência da luz, independentemente de sua intensidade;
- iv) isto seria inexplicável sem a hipótese da existência do fóton;
- v) não havendo nenhuma alternativa clássica, a teoria de Einstein tem sido naturalmente aceita;
- vi) a verificação final da teoria teria acontecido em 1916 com uma série de experimentos desenvolvidos por Millikan.

Apesar das críticas apresentadas anteriormente, Kragh considera importante a introdução de conteúdos históricos no ensino de ciências, defendendo a postura de que, para poder solucionar o dilema entre a verdade histórica e a utilidade didática, esta introdução deve ser feita em conexão com poucos casos cuidadosamente selecionados e sem o intuito de doutrinar.

Outro tipo de críticas refere-se a quando a Mecânica Quântica deve ser ensinada. Merzbacher (1990, p.717) justamente questiona o fato de que os conteúdos de Mecânica Quântica aparecem ao final dos cursos introdutórios de Física, citando que, por exemplo, *"...o livro Fundamentos da Física, de Halliday e Resnick, considerado o modelo de livro de texto da segunda metade do século, tem 1150 (!) páginas de texto, começando apenas na página 978 a Física Quântica..."*. Ele considera que os conceitos quânticos devem permear todo o curso introdutório, fornecendo aos estudantes das carreiras científicas *"a gramática elementar e o vocabulário da Mecânica Quântica"*

Por último, estão as críticas filosóficas. Existem numerosos artigos que criticam o tipo de interpretação "oficial" que é passada aos estudantes -- a chamada interpretação ortodoxa. Os defensores de outros tipos de interpretação -- em particular as denominadas realistas --, como Bastos Filho (1994, p. 486) consideram que *"os estudantes ainda aprendem que o que Bohr escreveu em 1927 é a última palavra sobre a questão. Aparentemente, não há oposição. Mas se prosseguimos sem apresentar aos estudantes os dois lados da moeda, continuarão incapacitados para qualquer discussão conceitual sobre a Mecânica Quântica"* pois a forma de apresentação da Mecânica Quântica nos cursos introdutórios *"na direção de questões incompreendidas, impossíveis, milagrosas e misteriosas"* leva os estudantes à conclusão de que nada tem de ser compreendido. Da mesma opinião é Silveira (1992, p. 59), que considera que o ensino de Mecânica Quântica, tanto em nível de graduação como de pós-graduação é formalista e não conceitual, em decorrência da própria interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica, a interpretação da Escola de Copenhague. *"Esta interpretação é calcada na filosofia do positivismo lógico.....[segundo a qual] não há o que entender em uma teoria; há sim que dominar o seu formalismo, a sua Matemática, sem se preocupar com o significado conceitual..."*.

- ? Como foi indicado no início desta seção, o denominador comum destes artigos -- a maioria deles escritos por físicos -- é que o ensino introdutório de conteúdos de Mecânica Quântica, apresentado às vezes em forma axiomática, às vezes em forma "quase-histórica", é ineficiente. Em geral, as críticas são mais uma constatação das falências percebidas pelos docentes, tanto em seus estudantes como nos livros de texto, e não estão fundamentadas explicitamente a partir de referenciais teóricos, a exceção dos trabalhos de Silveira e Kragh. As pesquisas apresentadas na categoria anterior reforçam estas críticas pois mostram que, efetivamente, os estudantes, incluindo ainda muitos daqueles considerados bons, não conseguem compreender (ou compreendem de forma incorreta) questões centrais para a descrição do mundo microscópico.

4. Propostas didáticas

Como melhorar o ensino da Mecânica Quântica? Este é o ponto central dos artigos que analisaremos nesta seção. Como as propostas são muitas e variadas, tanto no que se refere ao nível (secundário ou universitário) em que devem ser implementadas, quanto nas suas abordagens, escolhemos apresentá-las segundo o critério do nível educacional.

4.1 Para o ensino médio, as propostas parecem enquadrar-se em quatro abordagens bem diferenciadas

4.1.1 Histórico-filosófica

Os defensores deste tipo de proposta consideram importante o ensino da Mecânica Quântica (e de tópicos de Física Moderna, em geral) por ser parte da herança cultural do nosso tempo. Acreditam que os estudantes devam perceber as mudanças epistemológicas e culturais decorrentes do seu surgimento e que para isto o melhor caminho é a introdução histórica, destacando as diferenças em relação aos modelos e as formas de raciocínio da Física Clássica.

Gil e Solbes (1993) propõem um modelo construtivista em que os estudantes se envolvam em atividades e situações problemáticas que lhes permitam questionar as formas de pensar clássicas, facilitando-se, assim, a aceitação das novas hipóteses. Esta proposta foi implementada na Espanha, com 180 estudantes dos últimos anos do ensino médio (16-18 anos) e, segundo os autores, conseguiu-se que apenas um terço dos estudantes apresentasse, ao final da instrução, concepções erradas a respeito da dualidade onda-partícula e do Princípio de Incerteza. (Nos grupos de controle estas porcentagens variaram entre 83 e 93%).

Lühl (1992) propõe a utilização do método histórico-genético para que os estudantes percebam as complexas interações subjacentes ao desenvolvimento científico. Como exemplo propõe o acompanhamento dos acontecimentos históricos e filosóficos da teoria atômica, desde Tales de Mileto até a Mecânica Quântica.

Freire et al (1995), que consideram essencial a introdução tanto de temas clássicos como quânticos no nível médio como *"produto histórico da nossa civilização e não como uma disciplina que só tem expressões com significado matemático"*, acham que isto pode ser feito em diferentes partes do currículo, modificando necessariamente as apresentações dos conceitos da Física Clássica. Por exemplo, no momento de apresentar as leis de Newton, seria importante discutir seu caráter determinista. Isto permitiria compará-las com a descrição quântica, essencialmente probabilística, introduzindo o Princípio de Incerteza. Este exemplo, em particular, foi posto em prática em uma disciplina de uma escola de ensino médio da Bahia. Os autores indicam que quando os estudantes perceberam que o Princípio de Incerteza era um traço fundamental da realidade física descrita pela Mecânica Quântica, em contraposição à sua interpretação inicial –como limitação tecnológica – o inconformismo foi muito pronunciado. Os estudantes manifestaram a sua crença de que uma descrição determinista dos átomos deveria ser encontrada em um futuro próximo e, em forma paradoxal, uma parte significativa dos mesmos incorporou a segunda lei de Newton como uma grande descoberta científica justamente pelo determinismo universal que implicava.

Pinto e Zanetic (1999) implementaram uma proposta em aulas da segunda série do ensino médio da cidade de Guarulhos, SP, embasada nos perfis epistemológicos⁵ de Bachelard, sobre o conceito de luz. Durante 12 aulas foram abordadas diversas formas do conhecimento científico, destacando a descrição histórica da luz (desde as formas pré-científicas até a descrição quântica), o aspecto filosófico (os perfis epistemológicos: animismo, realismo, racionalismo e ultra-racionalismo), as atividades experimentais (efeito fotoelétrico e utilização do interferômetro de Mach-Zehnder) e atividades lúdicas. Para os autores, este tipo de aulas aumentou o interesse dos alunos pela Física, embora considerem que a maioria dos alunos aprendeu pouca Física Quântica.

4.1.2 Estabelecimento de elos com a Física Clássica

Nestes trabalhos se considera que parte da dificuldade para a introdução dos conceitos quânticos deriva do fato de que, além de ser apresentada tardiamente, tende-se a enfatizar as

⁵ Segundo Bachelard (1972, apud. Pinto e Zanetic, 1999, p. 10), a evolução filosófica de um conhecimento científico particular é um movimento que atravessa as diversas explicações metafísicas (animismo, realismo, positivismo, racionalismo, racionalismo completo e racionalismo dialético), idéias estas que podem coexistir na forma de pensar dos estudantes e com as quais deve-se lidar para conseguir algum tipo de aprendizagem.

diferenças e os contrastes com a Física Clássica, acontecendo, muitas vezes, que o aluno ignore os conceitos clássicos correspondentes. Por isso, a proposta consiste em começar destacando aspectos comuns entre a Física Clássica e a Moderna. Cuppari, Rinaudo, Robutti e Violino (1997) consideram que é possível introduzir alguns aspectos da Mecânica Quântica utilizando a idéia de granularidade intrínseca no espaço de fase, chegando a uma ação elementar h . A idéia é que os estudantes possam adquirir familiaridade com os limites da Mecânica Clássica, podendo os gráficos do espaço de fase desenvolverem-se até incluir a idéia do Princípio de Incerteza. Uma avaliação parcial da proposta, em um curso de ensino médio em Torino, Itália, mostrou que os estudantes não apresentam dificuldades para entender o movimento no espaço de fase e em aceitar, em nível qualitativo, a idéia de granularidade. Jones (1991), que propõe usar a lógica e não a história, sugere começar a partir da teoria clássica ondulatória e da discussão dos modos de oscilação e das ondas estacionárias, para introduzir a noção de difração de elétrons.

4.1.3 Apresentação da Mecânica Quântica sem elos com os conceitos clássicos.

Segundo esta proposta, defendida pelo grupo da Universidade Livre de Berlim (Fischler & Lichtfeldt, 1991, 1992), é necessário evitar que os estudantes interpretem os fenômenos quânticos a partir de conceitos clássicos, quebrando explicitamente com idéias anteriores e enfatizando os aspectos singulares da descrição quântica. Para isso, deve-se (Fischler & Lichtfeldt, 1992, p. 183) :

- a) evitar as referências à Física Clássica;
- b) começar a unidade com elétrons (e não com fótons) quando se apresente o efeito fotoelétrico;
- c) explicar os fenômenos observados a partir da interpretação estatística e evitar as descrições dualísticas;
- d) introduzir o Princípio de Incerteza o quanto antes possível, formulado para "ensembles" de objetos quânticos;
- e) evitar o modelo atômico de Bohr.

Como foi mencionado anteriormente esta proposta foi implementada em vários cursos (N=150). Os pesquisadores indicam que este tipo de abordagem favorece o aparecimento de conflitos cognitivos que levarão o estudante a revisar conscientemente suas posições anteriores e, portanto, a reconstruir seu conhecimento. Em contraposição, os resultados do grupo de controle apontam à incorporação das novas idéias às velhas concepções mecanicistas.

A proposta de Niedderer & Deylitz (1999) aponta no mesmo sentido. Implementada durante 10 anos em uma disciplina de física atômica e nuclear do último ano do ensino secundário alemão, esta proposta salienta os pontos a seguir.

- a) Uma representação moderna da física atômica, utilizando a equação de Schrödinger como base teórica. O cerne é a compreensão conceitual e a interpretação da mesma, sem um aprofundamento maior na discussão matemática. Recursos computacionais foram utilizados para modelar a equação de Schrödinger

b) Estabelecimento de relações entre o modelo quântico estudado e uma ampla variedade de fenômenos da física atômica, do estado sólido e da Química.

Esta proposta foi avaliada mediante entrevistas e questionários, ministrados antes e depois da instrução, a 26 estudantes de três cursos diferentes. O conteúdo foi dividido, para fins de pesquisa, em 6 domínios de conhecimento (átomo, função de onda, noção de estado, equação de Schrödinger, transferência do conteúdo teórico da equação de Schrödinger para explicar resultados de medições, átomos superiores) e as respostas dos estudantes foram qualificadas em uma escala de 0 a 2 pontos, segundo fossem mais ou menos adequadas àquelas esperadas pelos pesquisadores. Os resultados mostram que somente em uma das turmas uma parte importante dos estudantes conseguiu uma boa compreensão dos tópicos tratados, sendo o entendimento matemático da equação de Schrödinger o domínio em que os estudantes se saíram pior (com uma média inferior a 1 ponto). Nos outros dois grupos, os estudantes somente alcançaram alguns dos objetivos pretendidos nas áreas do modelo atômico e da compreensão de algumas relações entre o modelo teórico e suas aplicações (com médias de 0,7 em ambos casos). Os autores concluem que, mesmo não sendo possível para a maioria dos estudantes desenvolver uma melhor compreensão da descrição teórica proposta, muitos deles teriam conseguido, em média, um bom entendimento de conceitos quânticos fundamentais.

4.1.4 Abordagem experimental

Nestes artigos se enfatiza fundamentalmente a importância das experiências para o processo de aprendizagem. Lawrence (1996, p. 278) propõe usar modernos dispositivos experimentais, em particular LEDs (diodos de emissão de luz), e simulações computacionais para a introdução dos conceitos de quantização, dualidade onda-partícula, não-localidade e tunelamento. Embasado no modelo de mudança conceitual de Posner et al. (1982), considera que a utilização de *"argumentos sustentados em experiências de laboratório, demonstrações, discussões e o conhecimento prévio dos estudantes, permite conseguir que a visão quântica do mundo se torne inteligível, plausível e frutífera, incorporando-se à bagagem cultural dos estudantes"*. O autor manifesta que os estudantes se integraram à atividade em forma entusiasta, embora não indique se os mesmos haviam ou não compreendido os conceitos pretendidos.

Stefanel (1998) discute a necessidade de incorporar de maneira não descritiva os conteúdos de Mecânica Quântica. Considera que a atividade de laboratório (p. 38) *"ainda que limitada aos aspectos introdutórios é a base desta abordagem experimental"*. Sua proposta envolve a apresentação das experiências de difração e interferência da luz como suporte fenomenológico da discussão dos princípios quânticos; discussão de aspectos implícitos à descrição da Física Clássica, como causalidade e determinismo; aprofundamento quantitativo sobre efeito fotoelétrico, efeito Compton, experiência de Franck-Hertz e modelos atômicos; interpretação probabilística da função de onda e do Princípio de Superposição; e aplicações destes conceitos para explicar propriedades da matéria como o átomo, o tunelamento e as propriedades elétricas dos sólidos (com experiências sobre efeito Hall). Embora esta proposta não pareça diferir muito das apresentadas em cursos introdutórios, o autor destaca como uma característica fundamental o "processo espiralado" em que os conceitos fundamentais foram tratados, provocando sucessivos refinamentos e aprofundamentos dos mesmos. A aplicação desta proposta, desenvolvida em Udine, Itália, durante 3 anos em cursos da última série do nível médio italiano, exigiu também uma adequação dos conteúdos de Física na disciplina anterior àquela em que

esta proposta foi implementada. A avaliação mostrou que mais da metade dos estudantes conseguiu incorporar de maneira adequada a interpretação probabilística e o Princípio de Superposição, assim como desenvolver exercícios numéricos simples. Cerca de 20% dos estudantes manifestou um domínio mais profundo dos conceitos-chaves da Mecânica Quântica. Os temas onde foram encontradas mais dificuldades são aqueles em que convivem abordagens semiclássicas.

- ? Caberia perguntar qual destas abordagens é melhor. Resulta difícil dizer. Pode-se ver que cada uma das quatro salienta aspectos diferentes, e às vezes até antagônicos, a serem ensinados: enquanto a primeira valoriza a incorporação da dimensão epistemológica da revolução quântica, as outras pareceriam enfatizar a aprendizagem de conceitos. A segunda proposta pretende proporcionar a aprendizagem de conceitos clássicos auxiliares enquanto a terceira tenta provocar o conflito cognitivo com as concepções que os estudantes trazem para a sala de aula. A quarta abordagem, em linhas gerais, enfatiza uma questão recorrente no ensino de Física que é a utilização de experiências como o recurso mais importante para convencer os estudantes da factibilidade de uma teoria científica, embora a proposta de Stefanel pareça avançar um pouco além disto.
- ? Outra diferença importante entre as propostas é o tempo a ser dedicado para estes tópicos: enquanto a terceira proposta está pensada para cerca de 80 horas-aula, as outras parecem utilizar de 12 a 25 horas-aula⁶. Para poder-se fazer uma avaliação das abordagens referidas há, no entanto, pelo menos duas dificuldades. Uma é de ordem teórica e se refere à ausência, em vários dos trabalhos, de explicitação do referencial teórico pedagógico em que estão inseridas as propostas e, em consequência, do que se está entendendo por aprendizagem em cada caso. A outra questão é de ordem prática, e decorre de várias delas não apresentarem avaliações que possam ser comparáveis. Aparentemente, todas elas conseguem alguma melhoria na aprendizagem embora, como dito anteriormente, não apareça de forma clara qual seja essa melhoria em muitos dos casos.
- ? É importante, também, destacar uma diferença marcante entre as propostas para o ensino médio, referente à questão da inserção: enquanto nos países da Europa e nos Estados Unidos a discussão gira em torno de como apresentar conteúdos sobre Mecânica Quântica, já efetivamente inseridos no currículo do nível médio, no Brasil, por exemplo, continua-se a discutir como tornar efetiva essa inserção⁷ (Freire et al, 1995, Pinto e Zanetic, 1999).

4.2 As propostas para o ensino de Mecânica Quântica nas disciplinas introdutórias das carreiras universitárias não se enquadram em abordagens tão definidas. De forma tentativa apresentamos a classificação a seguir.

⁶ Estamos considerando que a duração de uma hora-aula é de 50 minutos.

⁷ Certamente a estrutura curricular do ensino médio dos países europeus, em particular a alemã, difere muito da adotada em nosso país.

4.2.1 Abordagem histórica

O único trabalho nesta direção se distancia tanto da quase-história, criticada por Kragh, como das abordagens para o ensino médio denominadas de histórico-filosóficas. Rüdinger (1978) considera que embora existam propostas logicamente satisfatórias (Feynman's Lectures ou o curso de Física do MIT) para a introdução dos conceitos quânticos fundamentais, elas não são psicologicamente mais acessíveis, pois a mente humana (p. 145) "*é incapaz de dar em um único passo o imenso salto conceitual entre a percepção do cotidiano e o estranho mundo da física quântica*". Por isso, propõe que o salto seja dividido em pequenos passos que permitam ao estudante a transição, estabelecendo ao mesmo tempo as ligações fundamentais com a Física Clássica. Isto implicaria em refazer alguns dos estágios que historicamente foram tomados, enfatizando o Princípio de Correspondência e centrando a Mecânica Quântica na Mecânica Matricial e não na Ondulatória. Segundo ele, a obra que cumpre estes requisitos é "Mecânica Quântica" de Tomonaga (1966, apud. Rüdinger, 1978). Considera que a crítica a esta proposta, no que se refere a que não é necessário hoje que os estudantes percorram o caminho que deu origem à Mecânica Quântica, não é cabível pois se esses estágios foram importantes conceitual e psicologicamente, os estudantes necessariamente terão que percorrê-los. Embora esta seja, segundo seu autor, uma proposta válida para um curso de Introdução à Mecânica Quântica de um semestre de duração, foi implementada em uma disciplina de Mecânica Quântica de pós-graduação, com 16 estudantes, metade dos quais já haviam cursado esta disciplina no curso de graduação. Ao finalizar o curso a maioria dos estudantes, embora o considerassem difícil, expressaram haver compreendido por que certos conceitos tinham aparecido e o método teórico da Mecânica Quântica.

4.2.2 Visão filosófica

Em consonância com as críticas filosóficas, os artigos desta corrente apresentam como alternativa a apresentação de outras interpretações, além da interpretação ortodoxa, ou adotar a postura de que não há interpretação ainda. Santos (1976) propõe considerar-se a Mecânica Quântica meramente como um conjunto de regras de cálculo muito acuradas, mas cuja interpretação física profunda ainda não está completamente compreendida. Considera pedagogicamente útil apresentar-se tais regras de cálculo a partir de uma abordagem probabilística, onde as probabilidades quânticas sejam tratadas em pé de igualdade com as clássicas. Introduz assim uma formulação do espaço de Hilbert para teorias probabilísticas e a partir daí constrói alguns dos postulados da Mecânica Quântica.

Para Pessoa (1997), um curso introdutório possível pode apresentar desde o início diferentes interpretações do formalismo quântico (interpretação ondulatória – Schrödinger, da dupla solução – De Broglie, e da complementaridade – Bohr) a fim de que os estudantes desenvolvam "*sua própria interpretação privada*". Considerando como conceito essencial da Mecânica Quântica a dualidade onda-partícula, são apresentadas distintas experiências com o interferômetro de Mach-Zehnder para um único fóton, salientando-se os aspectos conceituais (dualidade onda-partícula, redução de estado e colapso da função de onda, não localidade, Princípio de Incerteza e indeterminismo) com o objetivo de permitir que o estudante adquira uma intuição sobre diferentes situações experimentais. Os resultados das experiências são explicados segundo as diferentes interpretações. Esta proposta foi implementada como um

curso de extensão universitária, ministrado na Estação Ciência, em São Paulo, em 1996. Os resultados desta implementação não são discutidos pelo autor.

4.2.3 Abordagem "particulista"

Hood (1993) propõe aceitar-se que (p. 291) "*matéria e radiação são particulistas em essência ... O movimento ondulatório observado da radiação e da matéria é uma aproximação, a nível macroscópico, de impactos aleatórios de um número grande de partículas, governadas por uma dinâmica quântica subjacente*". Com isso evitar-se-iam as discussões, segundo ele quase míticas, às quais conduzem, inevitavelmente, à introdução de noções dualísticas da radiação e da matéria, quando se começa a falar de entidades cuja natureza depende do experimento e que agem às vezes como onda e outras como partícula.

O autor propõe os seguintes estágios:

- a) introduzir a descrição quântica antes de qualquer discussão sobre ótica ou movimento ondulatório, de modo a que os modelos clássicos sejam facilmente visualizados como aproximação em grande escala desta descrição;
- b) destacar o caráter corpuscular da radiação e matéria, incluindo o spin entre suas propriedades;
- c) enfatizar que toda classe de movimento implica em uma dinâmica subjacente, que no caso microscópico é a teoria quântica.

A partir deste ponto podem ser introduzidos os conceitos quânticos, começando-se pelo experimento da fenda dupla para fótons e matéria, obviamente sem a tônica da dualidade.

4.2.4 Abordagens sobre tópicos específicos

É bastante comum encontrar na literatura artigos que propõem ou pelo menos discutem novas formas de apresentar diversos tópicos, de interesse tanto teórico quanto experimental, que poderiam ser úteis para melhorar o ensino de Mecânica Quântica. O volume especial da Revista Brasileira de Ensino de Física (1997, V. 19, nº. 1) traz vários exemplos a este respeito. Gomes et al. (p. 4) descrevem uma série de experiências (com ênfase em espalhamento e teoria da perturbação) que podem ser incluídas nas disciplinas de Introdução à Mecânica Quântica de modo a facilitar a mudança do enfoque, de teórico a experimental, nestas disciplinas. Bassalo e Cattani (p. 49) indicam como seria possível aos estudantes acompanhar trabalhos de pesquisas atuais, com conhecimentos básicos de Mecânica Quântica. Machado, Osório e Borges (p. 102) apresentam a solução da equação de Schrödinger independente do tempo para um poço quadrado assimétrico, que tem interesse prático em técnicas de crescimento de cristais e que pode ser resolvida com ferramentas quânticas básicas. Donoso e Barberis (p. 125) fazem uma exposição didática da descrição quântica de espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica, técnica amplamente utilizada em Física, Química e Biofísica. Mokross (p. 136) discute a questão da não-localidade na Mecânica Quântica.

Redish, Lei & Jolly (1997) desenvolveram uma unidade introdutória (5 semanas) partindo do pressuposto de que há uma nova audiência (estudantes das distintas Engenharias, da Química e da Biologia) para os tópicos de Mecânica Quântica e de que é possível desenvolver recursos computacionais (simulações e *softwares*) que permitam apresentar tais tópicos com uma matemática menos abstrata. Tendo em consideração os resultados de pesquisas anteriores (Bao, Jolly & Redish, 1996), foram desenvolvidas durante o curso atividades específicas com revisões sobre os diagramas de energia e as probabilidades clássicas e foram enfatizadas, com a utilização de *softwares* especialmente projetados, a interpretação dos poços de potencial, a compreensão dos autovalores de energia e a relação entre a energia cinética local e a curvatura da função de onda. Os resultados mostram que, ao final da unidade, os estudantes conseguiram resolver problemas relativamente difíceis sobre tais pontos, mas isso não significaria necessariamente que tenham compreendido os conceitos fundamentais ou criado um modelo quântico coerente, segundo se depreende das entrevistas realizadas com esses mesmos estudantes.

Em decorrência dos resultados obtidos na pesquisa em relação às dificuldades dos estudantes com o conceito de comprimento de onda de De Broglie (descrita no item 2 deste trabalho), Vokos et al. (2000) desenvolveram uma unidade didática sobre as propriedades ondulatórias da matéria. Esta unidade, com uma duração de 50 minutos e estruturada na forma de *tutorial* (Mc Dermott et al., 1996), foi centrada no contexto do fenômeno de interferência para a luz e para os elétrons, tentando atacar as dificuldades que tinham sido detectadas no estudo prévio. A população alvo deste trabalho foi semelhante em composição à do estudo anterior, sendo aplicado a 467 participantes. Antes da unidade os estudantes responderam um pré-teste e depois trabalharam em pequenos grupos. Este trabalho se complementava com um dever de casa. Na aula seguinte, foram aplicados pós-testes, com questões equivalentes às do pré-teste, porém em relação ao fenômeno de difração que não foi tratado durante a unidade. Os resultados obtidos indicam que, em relação a questões envolvendo os efeitos sobre os padrões de difração observados quando se variava a largura das fendas, 79% dos estudantes respondeu corretamente, sendo que 60% deu explicações adequadas, em contraposição aos estudantes que receberam instrução na forma tradicional, dos quais 61% respondeu corretamente, sendo que somente 24% deu explicações adequadas. Nas perguntas em os estudantes deviam mostrar sua compreensão em relação aos fatores que influenciam o comprimento de onda de De Broglie das partículas incidentes, 72% dos estudantes do grupo experimental respondeu corretamente, com 58% dando explicações adequadas, enquanto que só 25% dos do grupo de controle respondeu corretamente, sendo 13% dessas respostas acompanhadas de explicações adequadas.

4.2.5 Utilização de recursos computacionais

Assim como em outras áreas das Ciências, a utilização de recursos computacionais no ensino de conteúdos introdutórios sobre Mecânica Quântica é uma tendência que vem crescendo rapidamente nos últimos anos. Existem hoje, disponíveis na Internet, vários programas cujo objetivo é auxiliar aos estudantes a visualizar aspectos centrais do mundo microscópico. Rebello e Zollman (1999), da Universidade de Kansas, desenvolveram um projeto denominado "Visual Quantum Mechanics", cujo objetivo é introduzir tópicos de Mecânica Quântica, com a ajuda de simulações, de atividades interativas e de laboratórios, utilizando o mínimo possível de ferramentas matemáticas. O material está organizado em

unidades temáticas, cada uma delas com uma duração de 6 a 12 horas-aula. O conteúdo destas unidades aparece listado a seguir.

- a) Sólidos e Luz: nesta unidade os estudantes utilizam LED (diodos de emissão de luz) e lâmpadas de gás para compreender os conceitos de níveis de energia, bandas de energia e espectros atômicos.
- b) Luminescência: com o auxílio de materiais fluorescentes e fosforescentes os alunos estudam os efeitos de impurezas nas bandas de energia e na criação de estados metaestáveis.
- c) Ondas de Matéria: esta unidade está projetada para que os estudantes aprendam, a partir do microscópio eletrônico, sobre a natureza ondulatória das partículas, sobre as funções de onda, sobre a equação de Schrödinger (somente um tratamento qualitativo da mesma) e sobre os pacotes de onda.
- d) Tunelamento Quântico: a partir da utilização de um "software" que simula um microscópio eletrônico de varredura por tunelamento, os estudantes são introduzidos ao efeito de tunelamento e aos fatores que o influenciam.

Além destas unidades, duas outras (Diagramas de Energia Potencial e Ondas) foram introduzidas para preencher lacunas da Física Clássica que poderiam dificultar a compreensão dos conceitos quânticos. Este conteúdo foi implementado em uma disciplina de Física Contemporânea, oferecida a estudantes (N=17) que cursavam o segundo ano de Física Geral. Segundo Rebello e Zollman (op. cit.), esta abordagem pareceria ser bastante efetiva para a compreensão da natureza discreta dos níveis de energia em átomos e das bandas de energia em sólidos. Também pareceria facilitar a compreensão da natureza ondulatória da matéria, pois alguns dos estudantes do estudo conseguiram associar adequadamente probabilidades a funções de onda. Embora durante as aulas se tivesse evitado a utilização do modelo de átomo de Bohr, favorecendo a representação em termos de diagramas de energia, os estudantes não abandonaram o modelo atômico planetário aprendido em cursos anteriores. Por exemplo, no uso do modelo de átomo do diagrama de energia, muitos estudantes confundiram o eixo vertical no diagrama como representando a distância física desde o núcleo ao correspondente nível de energia. Também tiveram dificuldades para aplicar o Princípio de Incerteza, embora compreendessem que ele decorre do comportamento ondulatório da matéria, e não conseguiram entender os aspectos novos, em relação ao mundo descrito pela Física Clássica, envolvidos no tunelamento quântico.

4.2.6 Utilização de resultados de pesquisa sobre fundamentos da Mecânica Quântica

Vários artigos, muitos deles escritos por pesquisadores vinculados à área de Ótica Quântica (Schenzle, 1996; Barton, 1997; Eijnisman & Nussenzveig, 1997; Gerry & Knight, 1997; Scarani & Suarez, 1998; Zeilinger, 1999, Greca & Herscovitz, 2000) insistem na importância de introduzir no ensino os resultados experimentais obtidos nos últimos anos sobre os fundamentos da Mecânica Quântica. Estes resultados, muitas vezes realizações dos antigos "gedanken-experiments" ou relativos a paradoxos que permearam a história da Mecânica Quântica, nos permitem hoje discutir com clareza e com fatos experimentais, a teoria da medida (para um único sistema, sem necessidade de utilizar-se conjuntos de sistemas), a superposição de estados, a questão das probabilidades, os saltos quânticos e a não-localidade. Para Schenzle (1996) dado que o processo de compreensão na Mecânica Quântica é lento, pois seus conceitos

não resultam intuitivos à primeira vista, é necessário expor aos estudantes desde o início exemplos físicos simples que mostrem claros sinais de comportamento quântico -- e os exemplos conceitualmente elementares da Ótica Quântica cumprem esses requisitos. Zeilinger (1999) é da mesma opinião, agregando que o desenvolvimento de todas estas experiências tem permitido a uma nova geração de físicos uma compreensão "intuitiva" dos fenômenos quânticos. Nesse contexto, Barton (1997, p. 429) indica que já é hora de deixar de ensinar aos estudantes ficções não físicas como o "microscópio de Heisenberg" e ilustrar as abstrações da teoria da medida com medições não-demolidoras reais, onde interagem átomos e campos de luz, ou a não-localidade com experiências com campos emaranhados em cavidades sucessivamente atravessadas por átomos, etc., até as possibilidades de aplicação dos princípios quânticos em temas como a criptografia ou a computação quântica. Greca & Herscovitz (2000) destacam que, dada a importância da introdução de conteúdos quânticos a estudantes de cursos de Engenharia e as dificuldades envolvidas no ensino do tema, é necessária uma ação educativa forte que priorize exemplos baseados em experimentos recentes e discussões que apontem para características propriamente quânticas, em oposição às abordagens que buscam semelhanças com sistemas clássicos ou que só oferecem uma visão instrumentalista. Consideram que isto pode tornar as noções sobre tema um pouco mais "intuitivas". Scarani & Suarez (1998) propõem aprimorar os esforços didáticos de Feynman para tornar compreensível a superposição de estados, com a sua consequência mais simples que é a presença de efeitos de interferência, mesmo para uma partícula, como o experimento proposto por Elitzur & Vaidmann em 1993 e concretizado poucos anos depois. Gerry & Knight (1997) propõem deixar de tratar o famoso "gato de Schrödinger" como um paradoxo, mas sim como um fenômeno que pode ser observado experimentalmente. Adams (1998) sugere ademais que algumas destas experiências sejam discutidas ainda no ensino médio, colocando os estudantes verdadeiramente em contato com conhecimentos de fronteira⁸.

4.2.7 Cursos para estudantes de carreiras não-científicas

Se é difícil apresentar a descrição quântica nas disciplinas introdutórias das carreiras científicas, as dificuldades pareceriam aumentar quando o ensino é dirigido a estudantes de outras áreas. Segundo Hobson (1996), a saída não é a exclusão destes tópicos que, por outra parte, são muito populares. O autor apresenta um esboço de curso ministrado para estudantes de artes da Universidade de Arkansas, em que os tópicos de Física Moderna, fundamentalmente Mecânica Quântica, ocupam 50% do tempo. O enfoque é conceitual, sem utilização de ferramentas matemáticas, sendo abordados tanto temas tradicionais como outros que, mesmo em disciplinas mais avançadas, raramente aparecem. São tratados o efeito fotoelétrico, para introduzir a noção de quantização, o experimento da dupla fenda, desenvolvendo o Princípio de Incerteza, a função de onda, a interpretação probabilística, a idéia da equação de Schrödinger, a descrição quântica do átomo, como aplicação dos conceitos descritos anteriormente, os saltos quânticos, para introduzir o problema da medida, e o paradoxo EPR e o teorema de Bell, para a não-localidade. A maioria dos pontos relacionados é discutida junto com os experimentos (como os do EPR), que corroboram as previsões quânticas. Lawless (1982) apresenta também resultados positivos da introdução de uma unidade de Mecânica Quântica em um curso de História da Ciência para estudantes de artes da Universidade Aberta na Inglaterra, onde os temas são tratados conceitualmente, embora na seqüência tradicional.

⁸ O livro "*Quantum dynamics of simple systems*" (1996, editado por Oppo, G. L., Barnett, S. M., Riis, E. & Wilkinson, M.) apresenta um excelente conjunto de trabalhos onde experiências recentes em Ótica Quântica e em Eletrodinâmica Quântica de cavidades são discutidas a partir dos fundamentos da Mecânica Quântica.

4.2.8 Propostas curriculares

Não se pode deixar de fazer menção a importantes propostas de mudança na orientação dos cursos introdutórios de Mecânica Quântica, concretizadas em magníficos livros como o terceiro volume das "Feynman's Lectures on Physics" (Feynman, Leighton & Sands, 1966) ou o quarto volume do "Berkeley Physics Course -- Quantum physics" (Wichmann, 1971). A famosa frase de Feynman, de que o experimento da dupla fenda "*Contém a essência da Mecânica Quântica. Na verdade, ele contém seu único mistério*", resume as características de sua proposta, em que são introduzidas desde o início a dualidade onda-partícula e a superposição de estados. A discussão sobre este último conceito assim como a questão das probabilidades quânticas e do problema da medida ocupam uma parte importante do livro, sendo ilustradas por Feynman, com seu peculiar estilo, em uma série de "gedanken-experimenten" com dispositivos do tipo do Stern-Gerlach. O livro de Wichmann, por sua vez, introduz os conceitos quânticos fundamentais de forma a permitir interpretar resultados experimentais, como os dos espectros atômicos. Estas duas experiências de ensino formaram parte de um esforço destinado a melhorar o ensino da Física dos cursos universitários introdutórios nos Estados Unidos, durante a passada década de sessenta. Sua implantação foi feita em caráter exploratório em várias universidades americanas, porém muitas delas consideraram que os novos cursos não estavam adaptados aos estudantes a que se destinavam (Coleman, Holcomb & Rigden, 1998).

Nos últimos anos, está sendo desenvolvido, também nos Estados Unidos, um esforço semelhante. Parte do objetivo dos modelos que estão sendo testados em várias universidades é incluir mais Física do Século XX nos currículos. Assim, todos eles incluem, pelo menos, física quântica a um nível que permita alguma discussão sobre a equação de Schrödinger.

Os modelos adotados são:

- a) Seis Idéias, uma das quais corresponde à Mecânica Quântica, onde se ressaltam as características ondulatórias da matéria. Este modelo inclui muitas atividades de laboratório e exercícios computacionais.
- b) Partículas, onde são tratadas exclusivamente partículas e suas interações, permitindo introduzir um número importante de conteúdos de Física Moderna, com uma seção especial de Mecânica Quântica. Nesta proposta, os conceitos são introduzidos, sempre que possível, por atividades de laboratório.
- c) Estruturas e Interações, onde os conteúdos quânticos são introduzidos via Física Nuclear.
- d) Física em Contexto, em que são desenvolvidos os conteúdos físicos necessários para interpretar cada um de quatro contextos apresentados, um deles sendo o mundo quântico. Neste modelo não foram utilizados nem exercícios de laboratório, nem computacionais.

Os resultados de uma avaliação sistemática destes projetos (Coleman, Holcomb & Rigden, 1998) indicam que os estudantes receberam de forma entusiástica os conteúdos de Mecânica Quântica conseguindo, em alguns casos, como no modelo Seis Idéias, discutir as idéias da unidade correspondente a este conteúdo e responder detalhadamente a questões vinculadas com elas, mas que em outros, como em Física em Contexto, o nível matemático

exigido -- equações diferenciais e números complexos -- era muito elevado. Outra questão apontada é que os cursos introdutórios deveriam dispor de pelo menos 4 a 6 semanas para que os estudantes pudessem desenvolver certo domínio nos conteúdos quânticos.

Para encerrar este tópico é preciso mencionar o quarto volume do "Curso de Física Básica", de Moisés Nussenzveig (1998). Ainda que seguindo a seqüência tradicional, Nussenzveig enfatiza o caráter radical das mudanças introduzidas com a idéia de quantização e discute largamente os princípios quânticos a partir do conceito de estados de polarização de fótons. Com este exemplo, introduz a descrição matricial e tenta apresentar, de um modo mais palpável, questões importantes tratadas a partir de espaços de duas dimensões. A obra apresenta várias aplicações destes princípios, como os espectros de bandas da física dos sólidos, e discute tópicos interpretacionais, apresentando alguns famosos paradoxos e seu desfecho experimental.

- ? Da mesma forma que ocorre com as abordagens para o ensino médio, a maioria destas propostas não explicita qual o referencial de ensino-aprendizagem desde o qual estão formuladas, muitas delas parecendo reflexões sobre a experiência de aprendizagem e de ensino dos seus autores, ou sobre as preferências pessoais para determinado enfoque. Várias destas propostas não foram implementadas e para aquelas que o foram, as avaliações não parecem ter sido feitas de forma rigorosa. É interessante destacar que cada uma das propostas salienta aquilo que cada físico considera como a essência da Mecânica Quântica: para alguns é a presença de quantidades discretas ou de processos descontínuos; para outros, é o papel que as probabilidades cumprem na descrição do mundo microscópico; outros ainda consideram como essencial o Princípio de Incerteza e há os que consideram central a dualidade onda-partícula, assim como existem os que acham que o eixo da revolução quântica é a possibilidade de coexistência simultânea de estados. Apesar das diferenças, duas tendências parecem notar-se para as disciplinas introdutórias: a importância da discussão conceitual dos princípios quânticos e a incorporação de resultados de pesquisa sobre os fundamentos da Mecânica Quântica. Outro ponto que surge em mais de uma proposta é a necessidade do abandono de uma visão ondulatória da Mecânica Quântica. A utilização de recursos computacionais, em particular de simulações, é uma tendência em crescimento, embora sejam poucas as pesquisas que têm estudado seus efeitos ou os aspectos da aprendizagem que tais recursos facilitariam.

4.3 Na literatura encontramos somente um trabalho que discute especificamente a questão da compreensão de conceitos quânticos em estudantes de Licenciatura em Física. Euler, Hanselmann, Müller & Zollman (1999) trabalharam com 13 estudantes de uma disciplina de Seminários de Mecânica Quântica da Universidade de Kiel. Estes estudantes já tinham completado um curso específico sobre Mecânica Quântica e a disciplina em questão era a última em que os futuros professores veriam estes tópicos antes de começar a dar aulas na escola secundária. Os pesquisadores ministraram um questionário, com perguntas já usadas em outras pesquisas para detecção de concepções sobre conceitos quânticos em estudantes de ensino médio. Os resultados mostram que 10 dos estudantes responderam em forma clássica e dois em forma híbrida (usando conceitos clássicos e quânticos em igual proporção, dependendo das questões) sendo que somente um dos estudantes respondeu a maioria das questões com idéias consistentes com a física quântica. Estes estudantes foram divididos em dois subgrupos. O grupo experimental participou de três sessões especiais onde foram enfatizados aspectos conceituais da Mecânica Quântica, em particular os diferentes modelos atômicos e uma ampla

discussão sobre a importância dos distintos modelos e conceitos na evolução da física quântica. Segundo os autores, os resultados do pós-teste indicam que houve uma mudança conceitual significativa nos estudantes do grupo experimental, mostrando que a ênfase em conceitos de Mecânica Quântica ajudaria os estudantes a melhorar a aquisição de significados sobre os mesmos. Dado que estes estudantes dificilmente aprimoram seus estudos sobre tópicos de Mecânica Quântica depois de terminar o curso de formação, os autores consideram indispensável uma reorganização das disciplinas destinadas para o ensino da mesma dos cursos de Licenciatura, de modo a permitir uma maior reflexão conceitual.

Observações finais

De modo geral, então, é possível constatar que pesquisas sobre concepções dos estudantes, embora muito desenvolvidas em áreas como Mecânica, Termodinâmica, Ótica ou Eletromagnetismo, são muito escassas em relação a conceitos quânticos. O interesse a respeito do tema, porém, cresceu muito nos últimos anos. Os resultados obtidos até aqui parecem confirmar as suspeitas dos professores de que os estudantes não compreendem os conceitos quânticos propostos – ainda que as pesquisas não sejam conclusivas em indicar quais em particular, ou por que, em parte devido a que poucos deles têm sido pesquisados até hoje –, e que os alunos limitam-se, em geral, a manipular o formalismo ou, pior, evitam qualquer estudo posterior que envolva tais conceitos. Por isto, as abordagens tradicionais têm sido criticadas sob vários ângulos. Como respostas a essas críticas têm surgido diversas tentativas, muitas delas visando enfatizar aspectos conceituais da Mecânica Quântica, porém seus resultados estão ainda longe de ser conclusivos.

Referências

- ADAMS, S. Quantum bombing reality. *Physics Education*, London, v. 33, n. 6, p. 379-385, Nov. 1998.
- AMBROSE, B. S., SHAFFER, P. S., STEINBERG, R. N., McDERMOTT, L. C. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 67, n. 2, p. 146-155, Feb. 1999.
- AUBRECHT, G. J., MAY, D. B., KASSEBAUM, T. J., STITH, J. Introductory students' ideas about quantization and the photon. In: AAPT SUMMER MEETING, 1999, San Antonio. *Announcer*, College Park, v. 29, n. 2, p. 102, Summer 1999. Abstract.
- BAO, L., JOLLY, P., REDISH, E. Student difficulties with Quantum Mechanics. Oral Communication, AAPT Summer meeting, Phoenix, Aug. 8-6, 1996. Disponível na Internet: www.physics.umd.edu/perg/cpt.html. 15 de agosto de 2000.
- BASTOS FILHO, J. Dangerous effects of the incomprehensibility in microphysics. In: BARONE, M., SELLERI, F. (Eds.) *Frontier of fundamental physics*, New York: Plenum, 1994. p. 485-492.
- BARNETT, S. M. Reflections on the EPR paradox. *Contemporary Physics*, London, v. 39, n. 1, p. 81-82, Jan./Feb. 1998.
- BARTON, G. Quantum dynamics of simple systems. *Contemporary Physics*, London, v. 38, n.6, p. 429-430, Nov./Dec. 1997.

- BASSALO, J. M. F., CATTANI, M. S. D. Pesquisa com conhecimento de mecânica quântica de graduação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 49-63, mar. 1997.
- COLEMAN, L. A., HOLCOMB, D. F., RIGDEN, J. S. The introductory University Physics Project 1987-1995: what has it accomplished? *American Journal of Physics*, College Park, v. 66, n. 2, p. 124-137, Feb. 1998.
- CUPPARI, A.; RINAUDO, G. ; ROBUTTI, O., VIOLINO, P. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education*, Bristol, v. 32, n. 5, p. 302-308, Sept. 1997.
- EJNISMAN, R., NUSSENZVEIG, P. Átomos de Rydberg: estudos quânticos com átomos "quase-clássicos". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 90-101, mar. 1997.
- EULER, M., HANSELMANN, M, MÜLLER, A, ZOLLMAN, D. Students' views of models and concepts in modern physics. Paper presented at the ANNUAL MEETING NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING, Boston, MA. March, 1999. 4p. Disponível na Internet: www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst . 15 de agosto de 2000.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Learning quantum mechanics. In: INTERNATIONAL WORKSHOP IN RESEARCH IN PHYSICS LEARNING, THEORETICAL ISSUES AND EMPIRICAL STUDIES, 1991, Bremen. DUIT, R., GOLDBERG, F., NIEDDERER, H. (Eds), *Proceedings...* Bremen, 1991. p. 240-258.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.
- FLETCHER, P., JOHNSTON, I. Quantum Mechanics: exploring conceptual change. Paper presented at the ANNUAL MEETING NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING, Boston, MA. March, 1999. Disponível na Internet: www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst. 15 de agosto de 2000.
- FREIRE JR, O., CARVALHO NETO, R. A. de, ROCHA, J. F. M., VASCONCELOS, M., J. L., SOCORRO, M., ANJOS, E. L. dos. Introducing quantum physics in secondary school. THIRD Salvador: Instituto de Física – UFBA, 1995. 9p. (Publicações de Física, 002/95).
- FREIRE JR, O.; CARVALHO NETO, R. *O universo dos quanta: uma breve história da física moderna*. São Paulo: FTD, 1997.
- GARCÍA-CASTAÑEDA, M.. An abuse with the wave properties of matter. *American Journal of Physics*, College Park, v. 53, n. 4, p. 373-374. Apr. 1985.
- GIL, D., SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, London, v. 15, n. 3, p. 255-260, May/June 1993.
- GERRY, C. C., KNIGHT, P. L. Quantum superpositions and Schrödinger cat states in quantum optics. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 65, n. 10, p. 964-974, Oct. 1997.
- GOMES, P. R. S., ANJOS, R. M. dos, SANTOS, M. S., COSTA, I., ALMEIDA, L. de. Enfoque experimental no ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 4-10, mar. 1997.
- GRECA, I. M, HERSCOVITZ, V. E. Mecânica Quântica e intuição. Em PESSOA JR (Org.) *Fundamentos da Física 2 - Simpósio David Bohm*. São Paulo: Ed. Livraria da Física. 2000
- HOBSON, A. Teaching quantum theory in the introductory course. *The Physics Teacher*, College Park, v. 34, n. 4, p. 202-210, Apr. 1996

- HOOD, C. G. Teaching about quantum theory. *The Physics Teacher*, College Park, v. 31, n. 5, p. 290-293, May 1993.
- JOHNSTON, I. D., CRAWFORD, K., FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, London, v. 20, n.4, p. 427-446, Apr./May 1998.
- JONES, D. G. C. Teaching modern physics: misconceptions of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, Bristol, v. 26, n. 2, p. 93-98, Mar. 1991.
- KRAGH, H. A sense of History: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, Dordrecht, v. 1, p. 349-363, 1992.
- LAWLESS, C. Arts students and quantum theory in an Open University History of science course. *Studies in Higher Education*, Abington, v. 7, n. 2, p. 133-139, 1982.
- LAWRENCE, I. Quantum physics in school. *Physics Education*, Bristol, v. 31, n. 5, p. 278-286, Sept. 1996.
- LÜHL, J. Teaching of social and philosophical background to atomic theory. *Science & Education*, Dordrecht, v. 1, p. 193-204, 1992.
- McDERMOTT, L. C., SHAFFER, P. S., ROSENQUIST, M. L. *Physics by inquiry*. New York: John Wiley, 1996. v.1.
- McDERMOTT, L.C., REDISH, E.F. Resource letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, College Park, vol. 67, n. 9, p. 755-767. 1999.
- MACHADO, P. C. M., OSÓRIO, F. A. P., BORGES, A. N. Solução da equação de Schrödinger independente do tempo para um poço de potencial quadrado assimétrico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 102-105, mar. 1997.
- MARTON, F. Phenomenography. In: KEEVES, J. (Ed.) *Educational research, methodology and measurement: an international handbook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 95- 101.
- MASSHADI, A. Students' conceptions of quantum physics. In: WELFORD G. et al. (Eds.) *Research in science education in Europe*. London: The Falmer Press, 1996. p. 254-265.
- MERZBACHER, E. How shall we teach physics in the 21st century? *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 58, n. 8, p. 717, Aug. 1990.
- MOKROSS, B. J. Não-localidade na mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 136-151, mar. 1997.
- NIEDDERER, H. Alternative framework of students in mechanics and atomic physics; methods of research and results. In: 2ND INTERNATIONAL SEMINAR ON MISCONCEPTIONS AND EDUCATIONAL STRATEGIES IN SCIENCE AND MATHEMATICS, 1987, Cornell. NOVAK, J. (Ed.) *Proceedings...* Cornell, Cornell University Press, 1987. Cd-rom.
- NIEDDERER, H., DEYLITZ, S. Evaluation of a new approach in quantum atomic physics in high school. Paper presented at the ANNUAL MEETING NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING, Boston, MA. March, 1999. Disponível na Internet : www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst . 15 de agosto de 2000.
- NUSSENZVEIG, M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. v.4 Ótica, relatividade e física quântica.
- 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, mar. 1997.

- PETRI, J., NIEDDERER, H. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, London, v. 20, n. 9, p. 1075- 1088, Nov. 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, abr. 1999.
- POSNER, G. J., STRIKE, K. A., HEWSON, P. W., GERTZOG, W. A. Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, New York, v. 66, n. 2, p. 211-227. Apr. 1982
- REBELLO, N. S., ZOLLMAN, D. Conceptual understanding of Quantum Mechanics after using hands on experiments and visualization instructional materials. Paper presented at the ANNUAL MEETING NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING, Boston, MA. March, 1999. Disponível na Internet: www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst . 15 de agosto de 2000.
- REDISH, E., LEI, B., JOLLY, P. Student difficulties with energy in quantum mechanics. Oral communication AAPT Winter meeting, Phoenix, January, 1997. Disponível na Internet: www.physics.umd.edu/perg/cpt.html . 15 de agosto de 2000.
- RÜDINGER, E. On the teaching of introductory quantum mechanics. *American Journal of Physics*, New York, v. 44, n. 2, p. 144-148, Feb. 1976.
- SANTOS, E. Probabilistic approach to teaching the principles of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, New York, v. 44, n. 3, p. 278-283, Mar. 1976.
- SCARANI, V., SUAREZ, A. Introducing quantum mechanics: one-particle interference. *American Journal of Physics*, College Park, v. 66, n. 8, p. 718-721, Aug. 1998.
- SCHENZLE, A. Illusion or reality: the measurement process in quantum optics. *Contemporary Physics*, London, v. 37, n. 4, p. 303-320, July/Aug. 1996.
- SCHREIBER, Z. *The nine lives of Schrödinger's cat*. London: University of London, 1994. Master thesis.
- SILVEIRA, F. L. da. *Uma epistemologia racional-realista e o ensino de física*. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 1992. Tese.
- SOLBES, J.; CATALAYUD, M.; CLIMENT, J., NAVARRO, J. Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, 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*, Rosario, v. 11, n. 2, p. 35- 44, 1998.
- STORY, R. Bridging a quantum-mechanical barrier. *IEEE Transactions on Education*, New York, v. 41, n. 1, p. 54-60, 1998.
- STRNAD, J. Photons in introductory quantum physics. *American Journal of Physics*, College Park, v. 54, n. 7, p. 650-652, July 1986.
- STYER, D.F. Common misconceptions regarding Quantum Mechanics. *American Journal of Physics*, College Park, vol. 64, n. 1, p. 31-34. 1996.
- UNAL, R., ZOLLMAN, D. Students description of an atom: a phenomenographic analysis. Disponível na Internet : www.phys.ksu.edu/perg/papers/ . 22 de fevereiro de 2001.
- VOKOS, S., SHAFFER, P. S., AMBROSE, B. S., McDERMOTT, L. C. Student understanding of the wave nature of matter: diffraction and interference of particles. *American Journal of Physics*, College Park, Supp. vol. 68, n. 7, p. S42-S51. 2000.

ZEILINGER, A. In retrospect: Albert Einstein: philosopher – scientist. *Nature*, London, v. 398, n. 6724, p. 210-211. Mar. 1999.

Recebido em 10.11.2000

Aceito em 26.03.2001