Parte III - Implicações culturais e educacionais da teoria quântica

Ênfase conceitual e interpretações no ensino da mecânica quântica

Ileana M. Greca
Olival Freire Jr.

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Ênfase conceitual e interpretações no ensino da Mecânica Quântica

*Ileana M. Greca
Olival Freire Jr.*

1 Introdução

A pesquisa sobre ensino de Mecânica Quântica (MQ), tanto no nível universitário quanto no ensino médio, vem despertando interesse cada vez maior na área de ensino de ciências, nos últimos 15 anos. (MCDERMOTT; REDISH, 1999) Até pouco tempo atrás, o maior propósito para os estudantes universitários, que não fossem físicos ou químicos, para estudar MQ era uma melhor apreciação de sua influência na forma de compreender o mundo, argumento semelhante ao esgrimido pelos defensores da introdução de tópicos de física contemporânea no ensino médio. (GIL; SOLBES, 1993; LÜHL, 1992) Assim, Muller e Weisner (2002) consideram que, sendo a MQ a teoria que forneceu um novo marco para toda a Física, cidadãos formados deveriam ter a possibilidade de poder apreciar seus estranhos aspectos e a sua beleza. Indo um pouco além nesta mesma linha, Karakostas e Hadzidaki (2005) salientam que a MQ não somente nos propõe uma visão radicalmente diferente do mundo físico, senão que dá a base conceitual para a apropriada interpretação de uma ampla variedade de fenômenos naturais. Desde uma vertente diferente, relacionada com o impacto tecnológico da MQ, se argumenta que os estudantes não deveriam sentir um rechaço para com ela, sobretudo nos primeiros anos de ciências universitárias (GRECA; FREIRE JR., 2003), dado que é necessário dispor de mais pessoas, em áreas como as Engenharias e a Biologia, que possam desenvolver e manipular de forma apropriada tecnologia embasada em princípios de MQ. Mais ainda, Zollman (1999) enfatiza que um melhor ensino universitário de tópicos de MQ tem se tornado fundamental, pois os recentes desenvolvimentos em nanotecnologia e eletrônica

trazem para o mundo dos engenheiros e dos negócios dispositivos que somente podem ser apreciados pelos seus princípios.

Cabe destacar que ambas as posturas são complementares. Como salienta Hadzidaki (2008a, 2008b), neste momento, em que se espera que estudantes de toda classe de campos aplicados aprendam as ideias básicas e os cálculos técnicos da MQ, não deveríamos esquecer que uma educação científica responsável deve ir além da preparação efetiva de futuros cientistas e técnicos e ajudar os estudantes a compreender como a ciência se relaciona com toda a cultura, dar-lhes o conhecimento suficiente para participar da cultura científica quando seja necessário e oferecer-lhes a oportunidade de pensar sobre as implicações filosóficas derivadas da Física moderna, questões que passam, umas e outras, por uma apropriada compreensão conceitual da MQ.

Para conseguir estes objetivos, várias propostas didáticas diferentes têm aparecido. Assim, centrando-nos especificamente nos primeiros anos do ensino universitário e nos cursos de formação de professores, encontramos propostas focadas em discussões conceituais, em discussões filosóficas, em abordagens históricas, no uso de experiências recentes para aprofundar aspectos conceituais fundamentais e no uso (portanto, desenvolvimentos) de *softwares* especiais, tanto para aprimorar a visualização de certos conteúdos de Física clássica, necessários à compreensão da MQ, quanto para explorar características quânticas de sistemas microscópicos.¹ Estas abordagens podem ser, por sua vez, identificadas em dois grupos, com ênfases radicalmente opostas: de um lado, estão aquelas que de forma proposital evitam as relações com a Mecânica Clássica e o uso de analogias clássicas ou semiclássicas; e, do outro, as que salientam a relevância de estabelecer pontes com a Mecânica Clássica. Matzkin (2002) indica que estas diferenças parecem radicar fundamentalmente na concepção que os autores têm sobre o estatuto da MQ em relação à realidade. Ampliando esta ideia, consideramos que, no fundo, estas diferenças exprimem diferentes posturas sobre a interpretação mais apropriada da Teoria Quântica.

Neste trabalho, refletimos trazendo elementos da história da ciência, sobre a necessidade que toda pesquisa na área de ensino de Mecânica Quântica² - seja sobre formas mais eficientes de ensino ou sobre como os estudantes compreendem os conceitos quânticos - que pretenda enfatizar aspectos conceituais, parta, pelas características dessa teoria, de uma explicitação da interpretação privilegiada

1 Ver revisão de literatura em Greca e Moreira (2001). Sobre tema relacionado, revisão de literatura sobre ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio, ver Ostermann e Moreira (2000) e Pereira e Ostermann (2009).

2 Embora nesta apresentação tomemos exemplos de cursos de graduação e pós-graduação em Física, consideramos que nosso argumento é extensível a todos os casos envolvidos no ensino de Mecânica Quântica.

pelos autores. Embora fundamental, pois a interpretação adotada condiciona os tipos de abordagens possíveis, assim como os resultados das análises realizadas sobre a compreensão dos conceitos quânticos por parte dos estudantes, esta questão, no entanto, não é frequentemente abordada nas pesquisas na área.

2 O ensino não-conceitual da Mecânica Quântica

Dificuldades de compreensão de Mecânica Quântica são lendárias. Não somente os estudantes de graduação pesquisados não compreendem seus princípios básicos (AMBROSE et al. 1999; GRECA; FREIRE JR., 2003; JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; SINGH, 2001; VOKOS et al. 2000), embora seus tópicos fundamentais sejam muito repetidos - segundo Cataloglu e Robinett (2002), nos Estados Unidos, um estudante pode se encontrar com conteúdos semelhantes de MQ em até uns cinco cursos antes de se graduar -, senão que destacados físicos que têm trabalhado com ela o reafirmam. Por exemplo, John Bell expressa que “Quando era estudante, [teve] muitas dificuldades com a mecânica quântica. Foi reconfortante saber que mesmo Einstein teve dificuldades por muito tempo” (FREIRE JR, 2006); para Murray Gell-Mann (1980, p. 169-170), “A mecânica quântica é aquela misteriosa, confusa disciplina, que nenhum de nós realmente compreende mas que sabemos como usar” ou como diz Richard Feynman na sua famosa frase

Como o comportamento atômico é tão diferente da experiência ordinária, é muito difícil adquirir familiaridade com o mesmo, ele parece peculiar e misterioso para todos – tanto para o novato quanto para o físico experiente. Mesmo os especialistas não a entendem do modo como gostariam de entendê-la, e é perfeitamente razoável que isso aconteça porque toda a experiência, ou a intuição, humana direta se aplica a objetos em grande escala. (FEYNMAN, 1964, p. 1)

Além de sua estranheza, parte da dificuldade com seus conceitos, que se distanciam de conceitos culturalmente queridos como a causalidade, o determinismo ou a localidade, é sua apresentação, característica de disciplinas avançadas dos cursos de graduação, basicamente formalista, centradas na aprendizagem de métodos matemáticos de resolução de casos típicos, com pouca ou nenhuma discussão conceitual ou interpretacional. Destacamos que as disciplinas introdutórias de MQ (muitas vezes a única vez em que estudantes de carreiras de ciências diferentes da Física são expostos a esses conteúdos) tampouco tratam estas questões em profundidade: usando uma quase-história, na terminologia de Kragh (1992), com simplificações excessivas e erros, enfatizando ideias e imagens

desenvolvidas entre 1900 e 1920, anteriores aos desenvolvimentos propriamente quânticos, provocando erros conceituais. (JONES, 1991)

Qual a origem desta abordagem didática formalista e instrumental? Quicá a resposta que primeiro nos vem à cabeça seja que, dada a complexidade matemática da teoria, é necessário reforçar particularmente estes tópicos com os estudantes. Como destaca David Bohm na introdução do seu livro *Quantum theory* (1989, publicado originalmente em 1951) - livro, aliás, que em direção oposta à tendência nos Estados Unidos nessa época, tema que abordaremos adiante, discute durante muitas páginas uma e outra vez os conceitos centrais da MQ - além das ideias físicas que diferem completamente de nossa experiência cotidiana, na MQ

[...] o aparato matemático necessário para aplicar esta teoria mesmo para os exemplos mais simples é muito menos familiar que o correspondente para os problemas de mecânica clássica. Como resultado, existe uma tendência a apresentar a teoria quântica como sendo inseparável dos problemas matemáticos que aparecem nas suas aplicações. (BOHM, 1989, p. 1)

Outro fator, relacionado com a visão da geração de físicos posteriores aos fundadores da Mecânica Quântica sobre seus princípios é o destacado por Heilbron (2001), que indica que a maioria dos físicos, além do círculo próximo a Bohr, usava a maquinaria da Mecânica Quântica para estudar o mundo microscópico, sem se preocupar com questões conceituais ou interpretacionais. No entanto, vários livros didáticos europeus de pós-graduação do período posterior à Segunda Guerra, em particular alemães e franceses, tinham seções sobre questões de fundamentos e implicações epistemológicas. (KAISER, 2007, p. 33) Este predomínio da visão da Mecânica Quântica como “maquinaria de cálculo” teria sido reforçado particularmente nos Estados Unidos. Nesse país, segundo Schweber (1986), o desenvolvimento da física teria sido marcado pela coexistência nos mesmos departamentos de físicos teóricos e experimentais – dando maior ênfase aos experimentos e aplicações — e pela tendência americana ao pragmatismo. Esta postura, basicamente instrumentalista, não exige uma compreensão conceitual profunda sobre como sucedem os fenômenos, senão que privilegia o conhecimento de como aplicar os algoritmos necessários para fazer novos cálculos, o que não é pouco, no caso da Mecânica Quântica, embora não seja suficiente.

Além destas questões, encontramos um outro fator de muita relevância para o ensino, relacionado com os livros didáticos. Segundo Kaiser, como resultado do grande aumento do número de estudantes de graduação e pós-graduação em Física nos Estados Unidos, no contexto da Guerra Fria que sucedeu a Segunda Guerra Mundial, foi necessário tomar algumas decisões pedagógicas que afetaram especialmente o ensino de Mecânica Quântica, dado que, nos anos 50, somente

aqueles que a tivessem estudado podiam dizer que eram físicos. (KAISER, 2007) Assim, os departamentos de Física tiveram que reformular as disciplinas, acentuando aqueles elementos com os quais obtinham melhores resultados pedagógicos, como analisado por Kaiser:

Com o crescimento do tamanho das turmas, contudo, os aspectos filosóficos da mecânica quântica foram afastados das salas de aula. O objetivo da física era treinar ‘mecânicos quânticos’: os estudantes deveriam ser mais como engenheiros ou mecânicos do domínio atômico, que filósofos. [...] Face ao crescimento nas matrículas, a maioria dos físicos nos Estados Unidos reorganizou o conteúdo da mecânica quântica acentuando aqueles elementos que permitiam o tema ser ensinado tão rápido quanto possível, abandonando silenciosamente, ao mesmo tempo, os últimos vestígios de reflexões conceituais ou interpretativas que tanto tinham ocupado o tempo das aulas antes da guerra. (KAISER, 2007, p. 28-31)

Esta mudança de enfoque ficou expressa nos livros didáticos editados a partir de então que, de modo algum, segundo Kaiser, eram compatíveis com o espectro de posturas pedagógicas em relação à MQ no período entre-guerras. Um exemplo destacado é o livro de Schiff, amplamente usado na formação de físicos em todo o mundo. Kaiser nos lembra que Schiff foi aluno de Mecânica Quântica de Oppenheimer, em Berkeley, curso muito popular entre os estudantes, no qual Oppenheimer apresentava a MQ como uma solução radical a problemas filosóficos e se adentrava em discussões sobre seus mistérios. Se Schiff não considerou relevante para seu livro incluir tópicos de discussões conceituais, parece pouco provável que os físicos posteriores, futuros professores dos cursos de graduação, sem uma formação conceitual específica sobre MQ, ensinassem de uma forma que não fosse a instrumental. O livro muito mais conceitual de Bohm ao qual fizemos referência anteriormente, aparecido na mesma época que o do Schiff, não teve a mesma acolhida que o conhecido livro de Schiff e, de fato, não foi reeditado, pelo menos nos anos imediatos.

Entre 1951 e 1980, foram publicados nos Estados Unidos, especificamente na área de Física, 33 livros de pós-graduação sobre MQ e uns 20 livros destinados a estudantes de graduação (KAISER, 2007, p. 32) que, embora com marcantes diferenças relacionadas com a abordagem que permitiria progressos mais rápidos (se a abordagem de Schrödinger, a das matrizes de Heisenberg ou a abordagem de *brackets* de Dirac), todos eles eram muito semelhantes, com longas listas de problemas de complicado cálculo e poucas questões conceituais que, de fato, não passavam de perguntas para resposta curta.

Esta tendência nos livros didáticos somente teria começado a mostrar alguma mudança em alguns livros aparecidos nos finais dos anos 60, quando o *boom* dos estudantes de Física nas universidades norte-americanas começou seu rápido declínio. Assim, livros como os de Eisberg e Resnick, além da longa lista de exercícios, incluíram algumas questões de discussão. No entanto, numa leitura desse livro se observa que há apenas uma página dedicada a apresentar a interpretação de Copenhague e são inexistentes questionamentos sobre os fundamentos da MQ. Como descreve Barton ainda no final do século XX, os livros-texto usuais, tanto os de nível introdutório como os mais avançados,

[...] 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 [...].³ (BARTON, 1997, p. 429)

De fato, uma visão rápida de cursos universitários de MQ nos mostra que, na maioria deles, continua-se a ensiná-la da mesma forma que há 70 e tantos anos atrás (FLETCHER; JOHNSTON, 1999) e os alunos continuam a ter essa visão de “cálculo” da MQ. (JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; REDISH; STEIMBERG, 1998; STORY, 1998) Ainda que se argumente que os físicos podem aproveitar seu conhecimento do formalismo matemático para superar as dificuldades conceituais (MULLER; WEISNER, 2002), resultados de pesquisa indicam que estudantes avançados de Mecânica Quântica, que têm aprendido a resolver a equação de Schrödinger com potenciais complicados, continuam com dificuldades conceituais em aspectos fundamentais. (GRECA; FREIRE JR., 2003; SINGH, 2001) Como indica Pospiech (2000), embora não parece ser possível uma compreensão conceitual da MQ sem um conhecimento aproximado de sua estrutura matemática, a própria complexidade do formalismo completamente desenvolvido parece impedir a muitos estudantes de obtê-la, pois este formalismo geralmente mascara aspectos filosóficos.

3 As interpretações da Mecânica Quântica na formação dos físicos

A Mecânica Quântica, diferentemente de outras teorias científicas, teve, desde sua origem, a característica notável de poder ser interpretada de diferentes maneiras, cada uma delas internamente consistente e, em geral, consistente

3 Embora esta caracterização corresponda aos Estados Unidos, a tradição de ensino de física em América Latina e na Ásia se embasa nela, portanto esses resultados podem ser pensados como mais gerais que para o caso norte-americano.

com os experimentos quânticos. Por interpretação, estamos usando a definição de Pessoa Jr. (2003): conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria e que em geral não afeta as suas previsões observacionais; se fizesse previsões novas, falar-se-ia de “teoria nova”.⁴

Embora no seu nascedouro e logo após, tenha havido intensos debates quanto às interpretações da teoria – o mais famoso, entre Bohr e Einstein –, a interpretação dominante foi aquela que viria a ser conhecida como a de Copenhague, fato tão marcante que Jammer (1974) denominou este período de “monocracia da escola de Copenhague”.⁵ No entanto, esta monocracia nunca se expressou nos livros-texto usados na formação dos físicos: Kragh (1999) destaca que dos 43 livros publicados entre 1928 e 1937, somente 8 mencionavam, e rapidamente, o princípio da complementaridade, princípio central na visão epistemológica de Bohr: “a maioria dos autores dos livros-textos, ainda que simpatizantes das idéias de Bohr, achava difícil incluir e justificar uma seção sobre complementaridade”. Kragh destaca que Dirac, autor de uns dos livros mais influentes de MQ, “[...] não via nenhuma necessidade de falar de complementaridade. Não resultava em novas equações e não podia ser usada para os cálculos que Dirac identificava com a física”. (KRAGH, 1999, p. 211) Em geral, quando alguma referência aparece nos livros, isso é feito na forma da mútua exclusão das representações de onda e partícula.

A junção entre esta “monocracia”, mais de discurso que de fato, e os contínuos êxitos práticos da teoria levaram à sensação que os problemas fundacionais da MQ tinham sido resolvidos pelos pais fundadores (FREIRE JR, 2006) e que questões interpretacionais da MQ eram assunto de filósofos e não de físicos profissionais.

Se levarmos em consideração que os livros-texto nos quais os físicos foram formados até a década de 50 não refletiam nenhuma preocupação acerca da interpretação da teoria (DE WITT; GRAHAM, 1973)⁶ e, a partir dali, segundo Kaiser, nos livros editados nos Estados Unidos tampouco enfatizavam questões conceituais – onde elementos interpretacionais podiam chegar a ter sentido –, pode-se concluir que os livros, em geral, privilegiaram uma visão “instrumentalista mínima” (REDHEAD, 1987): algoritmo de quantização e algoritmo estatístico, mais a premissa epistemológica (implícita) que “as teorias em física são simplesmente dispositivos para expressar regularidades entre observações”.

4 Para uma apresentação mais técnica da distinção entre formalismo e interpretação, ver Jammer (1974, p. 2-19).

5 Observamos, contudo, que estudos recentes têm evidenciado tanto a diversidade de perspectivas por trás da expressão “interpretação de Copenhague”, como o contexto histórico da criação desse termo. Ver: Howard (2004) e Camilleri (2009).

6 Exceção, nesse cenário, foi o já referido livro de David Bohm (1989).

Assim, existiu um reforço mútuo entre o enfoque didático da desvalorização das questões conceituais e a visão instrumentalista, afinal, esta última eximia os autores de livros-texto de aprofundamentos conceituais.

Como indica Kuhn (1970), os físicos são formados a partir dos livros didáticos. Portanto, esta breve descrição das ausências conceituais e interpretacionais nesses livros implica que elas aparecem nos cursos de graduação, sinalizando a ênfase basicamente instrumental na sua formação. Lembrando que, por sua vez, os livros didáticos de outras áreas ou de níveis inferiores tendem a reproduzir versões simplificadas do que aparece nos livros didáticos de graduação e pós-graduação, temos então uma cadeia de ausências nos dois aspectos assinalados. Cabe assinalar, por fim, que essa tendência não é inexorável e pode ser modificada. Exemplo de tentativa nessa direção, ainda no âmbito dos livros-texto, é o livro *Quantum challenge*, de George Greenstein e Arthur Zajonc, físicos do Amherst College nos EUA. Esse livro foi concebido, acreditando que questões de fundamentos “[...] podem ser apresentadas com razoável rigor e honestidade intelectual em uma apresentação acessível a estudantes de graduação de ciências físicas, matemática e engenharias”. (GREENSTEIN; ZAJONC, 1997, p. xv) O livro é largamente baseado em uma discussão de experimentos contemporâneos reais.

4 O caso de John Clauser⁷

O físico norte-americano John Clauser, nascido em 1942, concluiu seu doutoramento em 1969 na Columbia University, com um trabalho experimental de medida da radiação cósmica de fundo, sob a orientação de Patrick Thaddeus. Nesse mesmo ano, ele teve seu interesse deslocado para a possibilidade de testes experimentais com o teorema de Bell, campo no qual, junto com Abner Shimony, ele teve um papel pioneiro.⁸ Formado no final dos anos 60, Clauser exemplifica as dificuldades de compreensão que geram abordagens didáticas instrumentalistas da MQ para aqueles estudantes que necessitam ir além da aplicação de algoritmos de resolução de problemas. Ele se descreve como um pensador concreto, que necessita de um modelo conceitual para poder resolver problemas. E indica que uma das razões pelas quais teve que fazer três vezes um curso de pós-graduação em MQ era que a maior parte do curso era de manipulações matemáticas:

7 A apresentação desse caso está embasada na entrevista com John Clauser realizada por Joan Bromberg, 20 maio de 2002, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA. Disponível em <<http://www.aip.org/history/ohilist/transcripts.html>>. Todas as citações de Clauser foram daí extraídas.

8 Para uma análise da contribuição de Clauser ao estabelecimento do campo de pesquisas dedicado aos fundamentos da mecânica quântica, ver Freire Jr. (2006) e Freire, “Dissidentes quânticos”, nesse volume.

Uma das razões pelas quais eu não conseguia obter um B [no curso Mecânica Quântica Avançada] era que muito dele era somente manipulações matemáticas, e eu não sou muito bom em matemática abstrata ou pensamento abstrato; e não entendia, não sabia porque estava fazendo aquilo. E me sentia muito desconfortável.

Por outra parte, o único modelo conceitual fornecido pelos livros de MQ estava relacionado com uma interpretação ondulatória, que somente funcionava quando se pensava numa única partícula.

Os livros fazem a MQ parecer com uma simples mecânica ondulatória, i. e., o que se observaria através de uma analogia direta com as ondas na superfície de um tanque. E mostram imagens. [...]. E ainda pior, dizem: 'OK, uma partícula, podemos representá-la como uma espécie de pacote de ondas', o que quer que isso signifique, [...] se propagando num espaço real. [...] Agora considere o caso de duas partículas. Neste caso a Ψ não é mais uma função de x, y, z e t . É uma função de $x, y, z, x', y', z',$ e t . O espaço cresceu? [...] Se eu não posso [usar esse modelo] para o caso de quatro, três, duas partículas, não deveria poder fazê-lo tampouco para uma. O que significa toda esta idéia de pacotes de onda que todos os livros colocam?

Nos livros em que Clauser estudou as imagens fornecidas para dar uma ideia "intuitiva" da MQ parecem não ter colaborado para o seu entendimento, possivelmente porque elas não formavam parte do ideário didático dessas disciplinas – aprender a fazer cálculos. Assim, resultam em agregados, sem consistência interpretacional, ou seja, sem explorar as consequências da interpretação que se pode associar a estas imagens – uma interpretação realista ondulatória (PESSOA JR., 2003) – nos conceitos quânticos. Parecem ser justamente essas contradições as que dificultaram, no caso de Clauser, sua compreensão.

O interessante deste caso, salvando a questão das imagens ondulatórias apresentadas, é que a não adoção de uma interpretação é coerente com o tratamento "conceitual" dado: não é necessário compreender o que está acontecendo para saber aplicar as fórmulas adequadas.

De fato, Clauser coloca claramente esta questão ao indicar que na formação em Mecânica Quântica as questões conceituais parecem carecer de sentido. Os físicos treinados para trabalhar com o formalismo matemático não se importam com o significado físico das fórmulas com as que estão trabalhando.

Todos os livros estão escritos desta forma, e essa é a forma como as pessoas trabalham, e eu também. Eu não tenho a

mais remota idéia de porque estou fazendo desse jeito. E de fato, você escuta uma quantidade de pessoas que dizem “Bom, você não tem que entendê-la para usá-la. Somente siga as regras”.

O que este caso nos mostra é que se pode perfeitamente estudar MQ com esta abordagem, embora isso possa significar para muitos estudantes uma tarefa sem sentido, que os levará a afastar-se dela. Como indicam Johnston, Crawford e Fletcher (1998), embora seja esta uma forte tradição nos departamentos de Física – primeiro, ensinar como fazer as contas e, depois, quando o estudante se dedicar à pesquisa, preocupar-se com o que significam – parece ser já hora de mudá-la, dada a necessidade de que a MQ seja compreendida por profissionais que não serão pesquisadores em Física.

Clauser indica que, justamente por causa de suas dificuldades para compreender a MQ na forma em que lhe era ensinada, procurou diversos livros, entre eles *Nonlinear wave mechanics* de de Broglie, um livro crítico com relação à interpretação de Copenhague, que o encaminhou à leitura de trabalhos de Bohm e de Von Neumann, antecedentes do teorema de Bell que posteriormente ele testou experimentalmente.

5 As interpretações na pesquisa em ensino de ciências

Como referido na introdução, existe um interesse crescente na área em ensino de ciências por abordagens que enfatizem os aspectos conceituais da MQ. Possivelmente, parte desse interesse esteja relacionada com uma problemática pedagógica inversa à referida por Kaiser na década de 1950, nos Estados Unidos. Naquela época, a problemática era a superpopulação de estudantes em Física e a MQ era a matéria que devia ser conhecida pelos que queriam ser físicos. Atualmente, em que a Física não é mais a única estrela do firmamento acadêmico e que deve, portanto, justificar suas ações, o número decrescente de alunos matriculados faz voltar a investir na compreensão da MQ, pois é necessário “mão- de-obra” para o desenvolvimento tecnológico por ela desencadeado (nanotecnologia, ciência dos materiais, informação quântica).

É relevante ressaltar que parte deste desenvolvimento tem sido possível justamente pela florescente pesquisa sobre os fundamentos da MQ, desenvolvida nas últimas décadas do século XX. O que, pelo menos, resulta paradoxal: aqueles problemas que na década de 1950 eram considerados meramente filosóficos resultam ser, no final do século, o eixo central de uma área de pesquisa reconhecida pelos físicos, assim como o ponto de partida para uma tecnologia de ponta, no caso, a informação quântica.

Assim, embora o enfoque didático instrumentalista da década de 1950 não possa ser simplesmente associado a um campo amadurecido de pesquisa –, pois persistiram os problemas com o significado do formalismo quântico, somente que não tratados (sobretudo nos Estados Unidos) –, neste momento, parece, um enfoque didático mais conceitual poderia estar fortemente influenciado pelos desenvolvimentos tecnológicos de ponta, embasados justamente na retomada daquelas questões que ficaram sem solução nos primórdios da Mecânica Quântica.

O interesse em questões conceituais na área de ensino de ciências não aparece, no entanto, refletido com a mesma ênfase em questões interpretacionais, embora estejam, como estamos discutindo, indissoluvelmente associadas. Numa análise de artigos relacionados com o ensino da MQ em cursos ou disciplinas de Física, publicados entre 2000 e 2007 em revistas internacionais da área – *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, *International Journal of Science Education*, *Physics Education*, *Science Education* e *Science & Education* –, pode-se observar que dos 34 artigos aparecidos, somente 8 (menos de 1/4) explicitam a interpretação adotada.⁹ Nesses, foram adotadas uma interpretação realista de Bohr (HADZIDAKI, 2008a, 2008b; KARAKOSTAS; HADZIDAKI, 2003); de *ensembles* estatísticos (MULLER; WEISNER, 2002); interpretação de Copenhague (SINGH, 2001); interpretação ortodoxa realista (GRECA; FREIRE JR., 2003); interpretação bohmiana dualista realista (PASSON, 2004); e interpretação de estados quânticos como potencialidades. (POSPIECH, 2003)¹⁰ Desses trabalhos, 3 pertencem ao mesmo grupo de pesquisa e 5 se encontram em uma revista com ênfase nos aportes da História e da Filosofia da Ciência para o ensino de ciências (*Science & Education*).

Um dado interessante deste levantamento é que, à exceção de um deles, todos os trabalhos que de forma explícita adotam uma interpretação podem ser incluídos dentro do espectro das denominadas interpretações realistas – ou seja, interpretações que se afastam da postura epistemológica da interpretação de Copenhague, atribuindo um caráter objetivo ao conceito de estado de um sistema quântico, tornando-o menos dependente dos processos de medição. Essa tendência favorável a interpretações realistas coincide com a visão epistemológica predominante entre os físicos que estiveram na origem do campo de fundamentos da Teoria Quântica na década de 1970. (FREIRE JR., 2009)

9 Num período anterior, analisado em Greca e Moreira (2001), repete-se uma tendência semelhante.

10 Pospiech considera importante que sejam conhecidas diferentes interpretações da mecânica quântica, em especial os professores e estudantes de licenciatura. Tomamos as interpretações como identificadas pelos autores das pesquisas, sem a preocupação de avaliar possíveis superposições ou mesmo duplicações.

Voltando para a problemática das interpretações da MQ na pesquisa em ensino de ciências, a não explicitação da interpretação leva à permanência de dúvidas e ambiguidades em relação tanto às concepções dos estudantes, quanto às vantagens das abordagens didáticas propostas. Tomemos, por exemplo, uma frase que aparece em alguns questionários e também em respostas de estudantes: “O elétron é sempre uma partícula”. Embora esta frase pareça uma resposta clássica, não se pode afirmar, sem explicitar a interpretação a partir da qual se faz a afirmação, que uma resposta deste tipo seja necessariamente representativa de um pensamento mecanicista, clássico e, portanto, não apropriado para a compreensão do mundo quântico. Esta resposta, isolada, poder-se-ia associar a uma interpretação da Teoria Quântica, em consonância com as variáveis escondidas propostas por David Bohm, em 1952. Poderia ser associada também à interpretação dos *ensembles* estatísticos que tem sido adotada por vários livros-texto e à Lógica quântica, vez que esta pressupõe uma visão corpuscular. (MONTENEGRO; PESSOA JR., 2002, p. 109) Sendo bastante comum entre estudantes que têm cursado alguma disciplina de MQ, embora certamente de forma mais ingênua, poderia ser usada como ponto de partida para uma discussão conceitual dos princípios da MQ, sempre que se explicitassem as limitações e/ou dificuldades que ela apresenta. Obviamente, para outras interpretações, como as do tipo ondulatório ou a de Copenhague, a afirmação antes referida é incorreta.

De forma semelhante, questões referidas ao princípio de incerteza podem ter várias respostas, dependendo da interpretação privilegiada. Existem pelo menos duas interpretações possíveis. (JAMMER, 1974; PESSOA JR., 2003) Uma é a defendida pela interpretação ortodoxa e pela ondulatória que considera o princípio de incerteza aplicável a objetos individuais estando, portanto, limitadas em cada objeto, as medições de duas grandezas simultaneamente incompatíveis com uma resolução tão boa quanto se queira. A outra, é aceita pela interpretação dos *ensembles* estatísticos e das variáveis escondidas, em que a limitação se aplica somente a *ensembles* de eventos ou objetos.

Por outra parte, é evidente que as estratégias didáticas serão diferentes de acordo com a interpretação adotada. Assim, por exemplo, várias pesquisas que tentam tornar “visualizáveis” os fenômenos quânticos para assim fazê-los apreensíveis para os estudantes, a partir do uso de *softwares*, tendem implicitamente a adotar interpretações do tipo ondulatório que, por sua natureza, podem reforçar as ligações com a Física clássica. O problema com a adoção acrítica de uma dada interpretação, o que acontece quando não é explícita, é que pode ter consequências não desejadas, se não se discutem as limitações que têm ditas interpretações. Em geral, pareceria que estas abordagens que ancoram em ideias clássicas dos estudantes as reforçam, impedindo uma melhor compreensão dos conceitos quânticos, como acontece, por exemplo, com as dificuldades que os alunos têm para substituir a ideia de onda eletromagnética pela de onda de probabilidade

(GRECA; FREIRE JR., 2003), fazendo com que o gráfico da densidade de probabilidade seja considerado como um gráfico de movimento. Isto acontece também na Química, onde estudantes que aprendem o modelo ondulatório de átomo entendem o conceito de orbital como “campo espacial” e não como uma função matemática. (TSAPARLIS; PAPAPHOTIS, 2009) Além disto, estas interpretações tampouco conseguem dar respostas satisfatórias para uma série de fenômenos, em particular para aqueles relacionados com experiências recentes da Mecânica Quântica. Isto não quer dizer que não funcionem num dado âmbito, senão que dão uma visão que pode dificultar a compreensão do estudante em cursos posteriores, como indicado no caso de Clauser. Por isso, consideramos que o estudante deve estar consciente de que está trabalhando com uma dada interpretação da Mecânica Quântica e não com “a” sua interpretação.

Embora alguns pesquisadores considerem desejável que o estudante seja apresentado a várias interpretações da Mecânica Quântica nos seus primeiros cursos – há algumas propostas neste sentido, por exemplo, Pessoa Jr. (2003) e Pospiech (2003) – parece-nos preferível, dada a natureza tão pouco intuitiva dos conceitos quânticos, que o estudante pudesse se aprofundar neles de forma consciente desde uma determinada interpretação, para depois poder comparar com outras interpretações possíveis.

6 Considerações finais

Neste trabalho, buscamos argumentar no sentido de que seja qual for a estratégia didática que se pretenda desenvolver para aprimorar a compreensão dos estudantes da Mecânica Quântica, ela deve partir de uma explicitação clara sobre a forma em que os pesquisadores entendem o mundo microscópico descrito por ela. Como indica Hadzidaki (2008b), a construção de uma teoria didática deve embasar-se numa eleição explícita da interpretação adotada.

Dadas as características da MQ, as pesquisas na área em ensino de ciências referidas ao seu ensino devem se colocar uma pergunta não usual em Física: qual é a melhor interpretação ou quais interpretações apresentar? Lamentavelmente, esta pergunta não tem resposta simples, pois depende de vários fatores, como os compromissos epistemológicos dos pesquisadores, sua própria formação, os objetivos das implementações didáticas, assim como o tipo de alunos aos quais está dirigida a implementação. Possivelmente, sequências didáticas desenhadas para aprimorar a compreensão conceitual da Mecânica Quântica para futuros professores do ensino médio precisem de interpretações diferentes daquelas desenhadas para estudantes de ciências informáticas, que vão trabalhar com a teoria quântica na elaboração de *softwares* para computadores quânticos, embora

ambos precisem compreender os fundamentos da Mecânica Quântica. O que não se pode fazer é deixar a pergunta sem resposta.

Obviamente, toda esta discussão faz sentido desde que se considere importante a compreensão conceitual dos estudantes e não o treinamento de “mecânicos” quânticos. Uma visão meramente instrumentalista, como temos discutido neste trabalho, pode prescindir deste tipo de questões e, de fato, fazer mais rápido o avanço pela maquinaria quântica, embora ao preço de reduzir o alcance cognitivo da teoria, sem fazê-la mais compreensível.

Referências

AMBROSE, B. S. et al. C. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, v. 67, n. 2, p. 146-155, 1999.

BARTON, G. Quantum dynamics of simple systems. *Contemporary Physics*, v. 38, n. 6, p. 429-430, 1997.

BOHM, D. *Quantum theory*. New York: Dover, 1989. Unabridged republication of 1951.

CAMILLERI, K. Constructing the myth of the Copenhagen interpretation. *Perspectives on Science*, v. 17, n. 1, p. 26-57, 2009.

CATALOGLU, E.; ROBINETT, R. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 238-251, 2002.

DE WITT, B. S.; GRAHAM, N. (Ed.). *The many worlds interpretation on quantum mechanics: a fundamental exposition by Hugh Everett III with papers by J. A. Wheeler [and others]*. Princeton: Princeton University, 1973.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman lectures on physics: quantum mechanics*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1964.

FLETCHER, P.; JOHNSTON, I. Quantum mechanics: exploring conceptual change. In: RESEARCH on teaching and learning quantum mechanics: Annual Meeting National Association for Research in Science Teaching. Boston:

National Science Foundation, 1999. (Collection of papers presented). Disponível em: <www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst>. Acesso em: 2010.

FREIRE JR., O. *Dissidentes quânticos: pesquisa em fundamentos da teoria quântica em torno de 1970*. 2009.

_____. The historical roots of “Foundations of Quantum Physics” as a field of research (1950-1970). *Foundations of Physics*, v. 34, n. 11, p. 1741-1760, 2004.

_____. Philosophy enters the optics laboratory: Bell’s theorem and its first experimental tests (1965–1982). *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* v. 3, p. 577–616, 2006.

GELL-MANN, M. Questions for the future, 8th Wolfson lecture. In: MULVEY, J. H. (Ed.). *The nature of matter*. Oxford; England: Clarendon, 1980. p. 169-198.

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, 1993.

GRECA, I. M.; FREIRE JR., O. Does the emphases in the concept of quantum states enhance students’ understanding of quantum mechanics? *Science & Education*, v. 12, n. 5-6, p. 541-557, 2003.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino de mecânica quântica introdutória. *Investigações em ensino de ciências*, v. 6, n. 1, p. 7-106, jan. 2001. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>>.

GREENSTEIN, G.; ZAJONC, A. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett, 1997.

HADZIDAKI, P. The Heisenberg microscope: a powerful instructional tool for promoting meta-cognitive and meta-scientific thinking on quantum mechanics and the “nature of science”. *Science & Education*, v. 17, n. 6, p. 613-639, 2008b.

_____. “Quantum mechanics” and “scientific explanation” an explanatory strategy aiming at providing “understanding”. *Science & Education*, v. 17, n. 1, p. 49-73, 2008a.

HEILBRON, J. The earliest missionaries of the Copenhagen spirit. In: GALISON, P.; GORDIN, M.; KAISER, D. (Ed.). *Science and Society: the history of modern physical science in the twentieth century*. New York: Routledge, 2001. p. 295-330. (Quantum Histories, v. 4).

HOWARD, D. Who invented the “Copenhagen interpretation”? A study in mythology. *Philosophy of Science*, v. 71, p. 669–682, 2004.

JAMMER, M. *The philosophy of quantum mechanics: the interpretations of quantum mechanics in historical perspective*. New York: John Wiley & Sons, 1974.

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

JONES, D. Teaching modern physics: misconceptions of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, v. 26, n. 2, p. 93-98, 1991.

KAISER, D. Turning physicists into quantum mechanics. *Physics World*, p. 28-33, may 2007.

KARAKOSTAS, V.; HADZIDAKI, P. Realism vs constructivism in contemporary physics: the impact of the debate on the understanding of quantum theory and its instructional process. *Science & Education*, v. 14, n. 5, p. 607-629, 2005.

KRAGH, H. *Quantum generations: a history of physics in the twentieth century*. Princeton: Princeton University, 1999.

_____. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, v. 1, p. 349-363, 1992.

KUHN, T. S. *The structure of scientific revolutions*. 2nd ed., Chicago: Chicago University, 1970.

LÜHL, J. Teaching of social and philosophical background to atomic theory. *Science & Education*, v. 1, p. 193-204, 1992.

MATZKIN, A. Realism and the wave function. *European Journal of Physics*, v. 32, p. 285-294, 2002.

MCDERMOTT, L.; REDISH, E. 'Resource letter: PER-1: physics education research. *American Journal of Physics*, v. 67, n. 9, p. 755-767, 1999.

MONTENEGRO, R.; PESSOA JR., O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 7, n. 2, p. 107-126, 2002.

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

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

PASSON, O. How to teach quantum mechanics, *European Journal of Physics*, v. 25, p. 765-769, 2004.

PEREIRA, A. P. e OSTERMANN, F. Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, p. 393-420, 2009.

PESSOA, O. Jr. *Conceitos de Física Quântica*—São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

POSPIECH, G. Uncertainty and complementary: the heart of quantum physics. *Physics Education*, v. 35, n.6, p. 393-399, 2000.

POSPIEVICH, G. Philosophy and quantum mechanics in science teaching, *Science & Education*, v. 12, p. 559-571, 2003.

REDHEAD, M. *Incompleteness, Nonlocality, and Realism - A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Oxford: Clarendon Press - Oxford Univ. Press, 1987.

REDISH, E., LEI, B. & JOLLY, P. Student difficulties with energy in quantum mechanics. Oral communication AAPT Winter meeting, Phoenix, January. Disponível na Internet: www.physics.umd.edu/perg/cpt.html. 1997.

SCHWEBER, S. The empiricist temper regnant: theoretical physics in the United States 1920-1950. Part 1. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 17, p. 55-98, 1986.

SINGH, C. Student understanding of quantum mechanics. American Journal of Physics, v. 69, n.8, p. 885-895, 2001.

STORY, R. Bridging a quantum-mechanical barrier. IEEE Transactions on Education, v. 41, n. 1, p. 54-60, 1998.

TOULMIN, S. Regreso a la razón, Barcelona: Ediciones Península, 2001.

TSAPARLIS, G. & PAPAPHOTIS, G. High-school students' conceptual difficulties and attempts at conceptual change: the case of basic quantum chemical concepts. International Journal of Science Education, vol. 31, n. 7, p. 895-930, 2009.

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, Supp. vol. 68, n. 7, p. S42-S51, 2000.

ZOLLMAN, D. Introduction - Research on teaching and learning quantum mechanics. Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching, 1999, Boston. Collection of papers presented. Disponível na Internet: www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst. 2010.