

PROCESSO DE MEDIDA EM MECÂNICA QUÂNTICA: POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA NO CONTEXTO DO BACHARELADO.

THE MEASUREMENT PROCESS IN QUANTUM MECHANICS: POSSIBLE CONSEQUENCES TO PHYSICS EDUCATION AT THE UNDERGRADUATE LEVEL.

Rodolfo Alves de Carvalho Neto^(a), *Ileana Maria Greca*^(b),
Olival Freire Jr.^(a), *Roberto Rivelino*^(a)

a) Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

b) Universidad de Burgos, Espanha.

rodolfoacn@gmail.com, ilegreca@hotmail.com,

freirejr@ufba.br, onilevir@gmail.com

Resumo

Tendo em vista a atual literatura sobre ensino e aprendizagem de Mecânica Quântica adotamos o ponto de vista de abordar esta teoria sem elos de analogia com a Mecânica Clássica. Este trabalho tem como intuito contribuir para uma abordagem que discuta o Processo de Medida (PM) da MQ tomando por base epistemológica a Interpretação de Copenhague (IC), proposta por Niels Bohr, em 1927. Esta discussão é parte de um trabalho de pesquisa de doutorado, ainda em curso, que visa compreender como os alunos do bacharelado em Física internalizam o conceito de PM. Visando familiarizar o aluno com uma fenomenologia propriamente quântica para um contexto experimental bem definido, o presente texto propõe que se discutam os conceitos de Vetor de Estado Observáveis e os Princípios de Superposição e de Incerteza, bem como o uso não eliminável de probabilidade nas previsões quânticas, desde o início do contato dos estudantes com a MQ.

Palavras-chave: Processo de Medida em Mecânica Quântica, Princípio de Superposição, Princípio de Incerteza, Probabilidade.

Abstract

Considering the current literature on teaching and learning of Quantum Mechanics, we have adopted the viewpoint of addressing this theory without analogical links with Classical Mechanics. The main aim of this work is to contribute to an approach that discusses the Process Measurement, taking into account the epistemological basis of the Copenhagen Interpretation, proposed by Niels Bohr in 1927. This discussion is part of a doctoral research work still in progress which aims to understand how undergraduate students absorb this Measurement Process. In order to acquaint the undergraduate students with a quantum phenomenology in a well-defined experimental context, the present text proposes to discuss, since the first contact with MQ, the concepts of state vector, observable, and the principles of

superposition and uncertainty, as well as the indispensable use of probability in the quantum predictions.

Keywords: The Measurement Process in Quantum Mechanics, Superposition Principle, Uncertainty Principle, Probability.

INTRODUÇÃO

Os cursos de Mecânica Quântica (MQ) oferecidos na graduação costumam ter uma abordagem instrumental, visando familiarizar os estudantes com o formalismo da teoria, muitas vezes sem uma discussão conceitual e de possíveis interpretações acerca deste formalismo (GRECA & FREIRE, 2009). Já nos laboratórios o que se vê, em geral, é que a realização dos experimentos muitas vezes guarda um descompasso entre a compreensão teórica da Mecânica Quântica propriamente dita (formulada entre 1925 e 1927) com os resultados experimentais. A conhecida Velha MQ, formulada entre 1900 e 1925, é muitas vezes utilizada para dar conta de resultados experimentais, a exemplo, do espectro de emissão do átomo de hidrogênio sem que o aluno tenha ainda a compreensão adequada e rigorosa. Discussões epistemológicas referentes a MQ, por sua vez, quase nunca ou nunca são discutidas com estes alunos, se levarmos em conta a ausência desta abordagem nos clássicos livros utilizados no mundo inteiro. É necessário que se recorra a livros muito específicos para trazer à tona questões de fundamentos da MQ, como faz, por exemplo, o livro de Pessoa Jr. (2003).

O presente texto tem como objetivo mais geral, o mais amplo de todos, discutir o PM de forma integrada, articulando o aspecto preditivo da MQ e os princípios fundamentais, a exemplo do Princípio da Superposição, o significado do processo de medida no contexto da MQ, juntamente com um referencial epistemológico, sem deixar de lado o formalismo matemático da MQ. Os demais objetivos deste presente trabalho que serão citados ao longo do texto e sua reflexão em torno deles visa organizar idéias que são fundamentais na argumentação. Pretende-se numa fase mais avançada da pesquisa de doutorado de um dos autores desse trabalho, compreender como os alunos do bacharelado internalizam o conceito do PM em MQ. Todo esse trabalho justifica-se pelos pressupostos dos pesquisadores de que o entendimento do caráter revolucionário da MQ nos séculos XX e XXI tem correlação direta com o entendimento de um dos núcleos central da teoria: o processo de medida. O empenho para este estudo decorre, conforme veremos mais adiante na revisão de literatura, da lacuna que há mesmo para alunos da graduação de Física de não possuir uma visão integrada do processo de medida em MQ. Trata-se de um estudo teórico com abordagem epistemológica, experimental e matemática, tendo em vista o ensino de MQ.

PROCESSO DE MEDIDA EM MQ

A Física é uma ciência que lida essencialmente com a medida de grandezas físicas e com a predição dos valores dessas medidas em um contexto experimental bem definido. Para o físico dinamarquês Niels Bohr, a objetividade de uma teoria física reside justamente na capacidade de se transmitir de forma não ambígua os resultados de uma medida numa dada circunstância experimental. Nosso estudo tem como objetivo tratar do Processo de Medida (PM) em MQ tendo como base epistemológica a Interpretação de Copenhague (IC), também conhecida como Interpretação da Complementaridade, a qual foi proposta por Niels Bohr, em 1927.

Para Bohr, o PM da MQ exige que se especifique a forma como se prepara um dado sistema quântico, de modo que o objeto quântico não pode ser pensado sem levar em conta o aparelho de medida. Ele afirma que a linguagem para transmitir resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido deve ser feita através da Física Clássica. A descrição

da realidade de forma exaustiva exige, nesta perspectiva, a utilização complementar e excludente dos conceitos de fenômenos ondulatório e corpuscular. No que pese a utilização de uma linguagem clássica na forma objetiva de comunicar resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido, Bohr recorre ao postulado quântico para explicitar que as previsões quânticas irreduzivelmente probabilísticas, mesmo para eventos individuais, são essencialmente distintas daquelas oferecidas pela MC.

Neste trabalho tratamos do embasamento teórico sobre o PM em MQ com vistas a, numa fase ulterior, investigar de que formas os alunos se apropriam dos significados que serão descritos a seguir. Como quase toda a nossa intuição é construída a partir de uma vivência macroscópica, começaremos com a discussão do PM a partir do quadro teórico da Mecânica Clássica (MC), visando enfatizar a ruptura drástica entre esses dois Processos de Medida. A primeira pergunta que servirá para desencadear a discussão é: se tanto os fenômenos macroscópicos quanto os microscópicos ocorrem em um mesmo espaço físico ordinário (o espaço físico descrito pelas coordenadas espaciais), deveriam os processos de medidas nas respectivas escalas serem feitos do mesmo modo?

Visando melhor refletir esta pergunta, lembremos que na escala macroscópica podemos medir a quantidade de movimento do centro de massa de um planeta bem como sua posição num dado instante e com essas medidas podemos quantificar as demais grandezas físicas que eventualmente possam nos interessar, por exemplo, a energia do sistema Sol-Planeta, do momento angular planetário, etc. Podemos também, antes de observar uma dada rota, prever toda a evolução temporal da posição e velocidade e obter a equação da trajetória deste planeta, mediante a Segunda Lei de Newton mais as condições iniciais do problema e a lei da Gravitação Universal. Precisamos, é claro, neste contexto experimental, de um relógio e “grandes réguas”, para medir grandezas primitivas como espaço e tempo (que permitem a definição de velocidade) e, por conseguinte, das condições iniciais, necessárias para explicitar o determinismo clássico implícito na Dinâmica Clássica.

Retomando o PROCESSO DE MEDIDA na escala atômica e sub-atômica, previsto pela teoria quântica, deve-se frisar tratar-se de um processo inteiramente diferente daquele que utilizamos na grande maioria dos fenômenos macroscópicos. Visando familiarizar o aluno com uma fenomenologia propriamente quântica estamos propondo que se discuta, desde o primeiro contato com a MQ, os conceitos de Vetor de Estado, de Observáveis e dos Princípios de Superposição e de Incerteza, bem como o uso não eliminável de probabilidade nas previsões quânticas.

REVISÃO DA LITERATURA

Um resultado essencial observado foi o obstáculo epistemológico que a Física semi-clássica costuma criar no estudante, como, por exemplo, o átomo de Bohr, proposto em 1913 (GRECA, 2000). A crítica a analogias da MQ com a MC foi incorporada por compreendermos que há uma incompatibilidade entre tratar de uma nova Física com idéias antigas.

Iniciaremos nossa revisão da literatura a partir dos resultados publicados que abordam a aprendizagem de MQ sem elos de analogia com Física Clássica.

O grupo da Universidade Livre de Berlim (FISCHLER & LICHTFELDT, 1991; 1992) é o nosso primeiro exemplo dos adeptos dessa proposta (para o último ano do ensino médio, que corresponde, aproximadamente, ao primeiro de uma graduação no Brasil). Em particular, o grupo propõe que se evitem as referências clássicas, e sugere que se inicie o estudo do efeito fotoelétrico tratando do comportamento dos elétrons ejetados, e não dos fótons. Eles sugerem

que se apresente, o quanto antes, o princípio da Incerteza; que se evitem as referências ao átomo de Bohr; e que, desde o primeiro momento, se fale do emaranhamento quântico.

Greca e Herscovitz (2001) propõem que, desde o início, sejam abordados conceitos que possam contribuir para a apropriação de uma fenomenologia que culmine com uma intuição da MQ. Eles adotam, no ensino de graduação, o Princípio da Superposição como a ideia mais fundamental da MQ.

Carvalho (2006) e Carvalho, Freire e Silva (2008) apontam para a possibilidade de aprendizagem significativa do aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da MQ, sendo o “fio condutor” da experiência didática de ensino um vídeo que trata da interferência de elétrons (TONOMURA et al., 1989). A investigação acerca da aprendizagem foi feita a partir de mapas conceituais e entrevistas semi-estruturadas, com alunos do ensino médio, sob o referencial teórico da Aprendizagem Significativa, mostrando que existiu uma compreensão adequada por parte dos alunos de que o uso de probabilidade é essencialmente diferente daquele utilizado numa Física Estatística clássica.

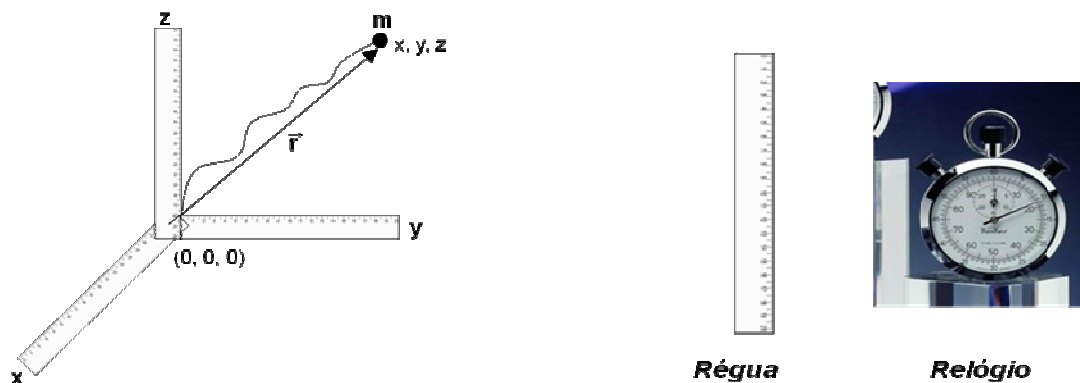
A crítica à abordagem da Velha MQ é feita também de forma contundente por Ostermann & Ricci (2005). Eles sustentam que “na abordagem tradicional costuma-se explorar modelos inspirados na MC de partículas para depois introduzir um modelo eminentemente ondulatório (Mecânica Ondulatória)”. Em oposição a esta abordagem, os autores optam por explorar a Óptica Ondulatória Clássica e a Mecânica Ondulatória de Schrödinger sem passar pela Velha MQ. Na sua proposta, que busca analogia da Física Clássica com a Física Quântica, Ostermann e Ricci (2005), utilizando-se de recursos computacionais, criaram uma bancada virtual para o experimento de Mach-Zender. Os pesquisadores investigaram em que medida o uso de um software educacional tipo bancada virtual facilita a aprendizagem dos alunos acerca do fenômeno da interferência quântica, com base no conhecimento da óptica ondulatória. Os autores sustentam que o software permitiu uma clara visualização das interferências clássicas e quânticas.

Greca & Freire (2009) argumentam que o ensino de MQ e os resultados de aprendizagem devem estar atrelados a uma explicitação de qual interpretação se está adotando, mesmo quando a análise das diferentes interpretações não é exatamente o foco do ensino. Assim, para estes autores, a dimensão epistemológica não deve ser desconsiderada da experiência do ensino-aprendizagem.

Como vemos, existem diversas propostas para uma primeira abordagem de conteúdos quânticos tanto no Ensino Médio quanto como na Graduação, consistentes com a argumentação de abordá-los sem elos de analogia com a Física Clássica ou com modelos semi-clássicos, propostos na velha MQ (1900-1925). O ponto central é que a fenomenologia quântica da MQ é essencialmente distinta da fenomenologia clássica e que insistir, por exemplo em pensar o elétron como uma onda ou partícula clássica é reforçar uma ideia errada no contexto da MQ. O conceito de Observáveis Incompatíveis, por exemplo, é conflitante com o conceito de trajetória. O presente trabalho visa, por essa razão, tratar do PM abordando-o de forma direta no contexto da MQ, para aproximar o aluno de conceitos quânticos que possibilitem a apropriação de uma fenomenologia da MQ.

PROCESSO DE MEDIÇÃO EM MECÂNICA CLÁSSICA: AS GRANDEZAS FÍSICAS NA ESCALA MACROSCÓPICA, EM PRINCÍPIO, PODEM SER MEDIDAS SIMULTANEAMENTE. NÃO EXISTEM GRANDEZAS FÍSICAS INCOMPATÍVEIS.

Adotaremos como ponto de partida para a construção do PM em MC a idéia de que com um relógio e uma régua podemos definir o espaço e o tempo e, conseqüentemente, a velocidade. Portanto, é possível construirmos a partir dessas noções primitivas a caracterização de um par de grandezas (que podem ser medidas simultaneamente) que terá um papel crucial na MC: a posição e a quantidade de movimento linear (ou momento linear). Um primeiro ponto essencial a destacar é a precisão ilimitada como que podemos idealmente medir simultaneamente tais grandezas distintas. Aqui não está se desconsiderando eventuais dificuldades tecnológicas e/ou erros de várias naturezas do processo de medida, mas sim frisando a não limitação da medição simultânea dessas duas grandezas. Conhecer o presente, do ponto de vista da MC, significa conhecer a posição e o momento linear. Define-se estado clássico de uma partícula como o par posição e momento linear no instante considerado. As grandezas físicas posição e momento linear nos definir e medir as demais grandezas que compõem a MC, tais como, energia cinética, momento angular etc. O processo de predição de tais medidas remete, neste caso, à MC.



A questão central a qual se depara a MC é: como prever o estado clássico de um corpo em todos os instantes de tempo?

Para medir o estado de um objeto macroscópico no espaço é necessário resolver a segunda lei de Newton, conforme explicitado a seguir.

$$F_x = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$F_y = m \cdot \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$F_z = m \cdot \frac{d^2z}{dt^2}$$

Dadas as condições iniciais e resolvendo as equações obtemos, no espaço, o estado x, y, z.

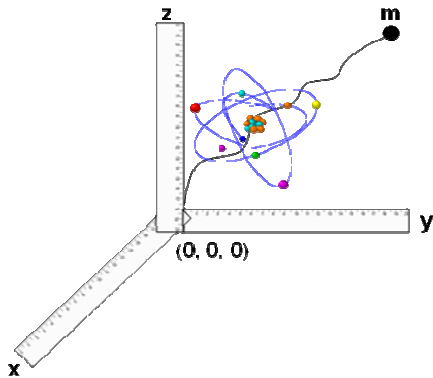
Note que o determinismo clássico assegura solução única de posição e velocidade no tempo. É importante frisar que medindo posição e quantidade de movimento de uma partícula podemos, em princípio, medir as demais grandezas físicas associadas ao fenômeno em questão. (energia, momento angular etc.).

Vale observar que no formalismo de Hamilton, o estado é escrito no espaço de fase por (x, y, z, p_x, p_y, p_z). No espaço abstrato de fase o conjunto de estados define a história do movimento. Note, contudo, que o fenômeno físico representado neste espaço ocorre no R³.

PERGUNTA CRUCIAL

É muito natural que se tenha admitido, no passado, a possibilidade de que o PROCESSO DE MEDIDA numa escala atômica devesse ser similar ao que se faz com base na MC, utilizando “relógio” e “régua diminutas”, de mesma ordem de grandeza dos átomos. Poder-se-ia pensar, por exemplo, se o movimento do elétron do átomo de hidrogênio em redor de um próton seria análogo ao movimento planetário. Uma outra questão que se coloca para discussão é:

É possível diminuirmos as dimensões das régua levando-as às dimensões atômicas e continuarmos fazendo medidas da mesma forma como fazíamos na MC?



A resposta é NÃO! Do ponto de vista da interpretação de Copenhague, há uma impossibilidade que expressa uma limitação do uso conceitual de trajetória. Esta limitação nada tem a ver com a ignorância humana ou com a insuficiência tecnológica. Um aspecto fundamental da teoria quântica, nos marcos da interpretação de Copenhague, está no fato de que a medida da posição é excluyente com a medida simultânea da quantidade de movimento. Como as grandezas físicas no contexto da MQ são chamadas de observáveis, dizer-se que momento

e posição são observáveis incompatíveis. Esta incompatibilidade expressa a perda do conceito de trajetória. Mas, afinal de contas, de que forma medimos a posição do elétron? Poderíamos usar “régua diminutas”? Entraremos, finalmente, num aspecto delicado da teoria quântica. Embora os fenômenos na escala atômica continuem ocorrendo no espaço tridimensional do mesmo modo que os fenômenos macroscópicos é crucial que se compreenda que os observáveis em MQ são descritos por operadores que atuam dentro de um espaço matemático (por exemplo, o espaço vetorial de Hilbert) que não carece de existência física. Entretanto, a partir de uma dada preparação experimental definimos um vetor de estado (dentro deste espaço vetorial) e aplicamos neste vetor um operador (no caso proposto seria o operador posição). O valor medido no laboratório (que é denominado de autovalor, neste caso associado ao observável posição) corresponde a um dos valores possíveis de posição cuja probabilidade nós podemos conhecer. É dessa forma que este espaço vetorial (de Hilbert) nos liga a realidade física, pois o que nos interessa, de fato, são os valores possíveis de medida no laboratório. É importante destacar que a abstração nas representações não é uma característica única da MQ. O espaço de fase, a propósito, tão usado em Física Clássica, mais particularmente em sistemas dinâmicos determinísticos e em Física Estatística, não é onde ocorre o fenômeno observado, mas nos liga a medidas que ocorrem no espaço tridimensional, no laboratório, por exemplo.

PROCESSO DE MEDIDA E SUA DIMENSÃO EPISTEMOLÓGICA

A controvérsia dos quanta, no que concerne aos problemas de interpretação dos fundamentos da teoria quântica, parece limitar a ideia kuhniana de que as controvérsias científicas estão circunscritas ao período de tempo próximo a formulação da teoria. No caso concreto da teoria quântica propriamente dita é oportuno lembrar que já estamos próximos do centenário da sua formulação (1925-1927) e vivemos uma situação singular na história da Física: uma ampla concordância quanto ao formalismo da teoria quântica, com êxito numa variedade extraordinária de fenômenos, com aplicações tecnológicas de ponta, coexiste, contudo, com uma controvérsia científica interpretativa mesmo nos dias atuais (FREIRE,

1999). Criou-se uma situação peculiar onde os atuais resultados experimentais não nos permitem, por critérios lógicos, decidir por uma interpretação ou por outra.

Falávamos, há pouco, num conceito que é um dos cerne da MQ à luz da interpretação de Copenhague: observáveis incompatíveis. Se tivéssemos, contudo, adotando a interpretação das variáveis escondidas, proposta na década de 50, pelo norte americano David Bohm, não haveria sentido falar, por exemplo, na impossibilidade da medição simultânea de posição e quantidade de movimento. O conceito de trajetória seria recuperado, e as descrições determinísticas colhidas mediante o uso da segunda lei de Newton seriam, por conseqüência, recuperadas. Como este trabalho tem um viés de ensino é imperativo explicitar a interpretação adotada (GRECA & FREIRE, 2009). A resposta dos alunos frente a uma dada questão pode ser considerada correta ou incorreta a depender da interpretação adotada. Ora, se levarmos em conta que as previsões da MQ bohmiana são (no âmbito não relativístico) equivalentes às da MQ bohmiana somos levado a concluir que a avaliação em termos de aprendizagem do aluno acerca de do processo de medida de uma teoria cujos fundamentos são controversos (ainda que isto não minimize em nada a credibilidade da teoria) deve-se, necessariamente, levar em conta a interpretação que está sendo adotada. Usamos a noção de interpretação como significando um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria científica, e que em nada afeta as previsões observacionais da teoria. (Se houver previsões novas, deveríamos falar em uma “teoria diferente”, mas se o desacordo com a Teoria Quântica for tão pequeno que não se possa fazer um experimento crucial para escolher entre elas, é costume considerar que a teoria diferente também é uma interpretação” (PESSOA JR, 2003, p.5.).

Passaremos agora a expor as principais ideias que, a nosso ver, caracterizam a interpretação de Copenhague.

A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE

A ideia mais essencial da interpretação de Copenhague foi, inicialmente, expressa pela impossibilidade de uso simultâneo das leis de conservação de energia e quantidade de movimento juntamente com uma descrição no espaço-tempo. Esta impossibilidade foi interpretada como conseqüência do pequeno e finito valor da constante de Planck, o Quantum de Ação, assumido como postulado. Aqui aparece claramente a idéia de observáveis incompatíveis, que advém desse postulado quântico, de acordo com a IC. Daí surge a idéia de perturbação incontrollável como uma característica inerente ao PM que inclui a interação do objeto microscópico com o aparelho de medida. A expressão “excluentes” surge neste contexto, onde a preparação de um sistema quântico é sempre incompatível com uma dada outra preparação e vice versa, embora uma descrição exaustiva e completa de um dado sistema físico exija um uso complementar e excludente dos arranjos experimentais incompatíveis. A ideia de totalidade (Wholeness) expressa precisamente a necessidade de levar em conta não somente o objeto mas também o aparelho experimental. Para Bohr, contudo, o físico terá necessariamente que continuar utilizando a linguagem clássica para transmitir resultados de sua medida, uma vez que o que nos liga com as medidas microscópicas são aparelhos macroscópicos.

Ilustraremos a completeza, ou seja, a necessidade de uso complementar e excludente de representações visando descrição completa e exaustiva de um sistema quântico. Pensemos, por exemplo, num experimento de fendas abertas com elétrons que exibirá um padrão de interferência (fenômeno ondulatório), mas se detectarmos por qual fenda o elétron passou o padrão de interferência é destruído (fenômeno corpuscular). Somente com os conceitos de “fenômeno ondulatório” ou “fenômeno corpuscular” obtemos uma descrição completa e exaustiva da realidade descrita, com uso complementar e excludente. Nesta interpretação,

contudo, os elétrons não podem ser identificados nem ondas e nem partículas clássicas e o aspecto preditivo intrinsecamente probabilístico da teoria quântica se aplica mesmo a eventos individuais. Deve-se ainda acrescentar que para Bohr o vetor de estado contém todas as informações do sistema. Foi dentro deste contexto, inclusive, que ele argumentou a favor de uma teoria quântica completa. Para Bohr a objetividade da Física está na capacidade dos físicos transmitirem seus resultados de medida em um contexto experimental bem definido de forma não ambígua. Tomaremos a liberdade de transcrever a sua fala para melhor esclarecer o significado profundo que ele atribui a constante de Planck:

“Quanto mais claramente percebemos que é impossível formular o conteúdo da teoria quântica com a ajuda de um único tipo de representação clássica, mais admiramos a feliz intuição de Planck ao cunhar o termo ‘Quantum de ação’ que de modo tão direto indica a insuficiência do princípio mínimo de ação, princípio cuja posição central na descrição da natureza ele sublinhou mais de uma vez. Este princípio simboliza, por assim dizer, a peculiar relação de simetria recíproca que se dá entre a descrição espaço-temporal e as leis de conservação e da quantidade de movimento...” (BOHR, *apud* FREIRE JR, 1999, p. 22)

Com respeito à ligação entre o postulado quântico o distúrbio incontrolável Bohr declarou que:

“... nossa descrição usual dos fenômenos físicos se baseia por inteiro na ideia de que os fenômenos podem ser observados sem perturbá-los de forma apreciável... agora, o postulado quântico implica que toda observação dos fenômenos atômicos leva junto uma interação com o aparato de observação que não pode ser desprezada. Por conseguinte não se pode considerar como realidade independente, no sentido físico ordinário, nem os fenômenos nem os agentes de observação.” (BOHR, *apud* FREIRE, 1999, p. 23)

A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE NUMA PERSPECTIVA OBJETIVA

Não temos aqui a pretensão de exaurir o pensamento de Bohr, mas sim de tentar mostrar posições de alguns cientistas, filósofos, e historiadores da ciência diferentes com respeito a sua interpretação. Embora, por exemplo, Bohr seja usualmente considerado um físico de interpretação positivista e anti-realista (PESSOA JR, 2003), sua posição também pode ser interpretada objetivamente, como destaca do físico Fock no seguinte trecho:

“Conversações pessoais levaram-me à firme convicção que em realidade [a] posição [de Bohr] está muito mais próxima da materialista do que pareceria da leitura de seus artigos sobre questões gnosiológicas da MQ. Primeira, e principalmente, Bohr é de opinião que a natureza de ser tomada como ela é; que nós estamos estudando a natureza e suas leis. Ele decisivamente expressa sua discordância com o ponto de vista positivista e admite plenamente a objetividade das propriedades dos objetos atômicos. No que se refere à terminologia, Bohr está preparado para renunciar ao uso do termo “interação incontrolável” que ele considera como inadequado. Bohr também concorda com o fato que o princípio geral da causalidade deve ser discernido do determinismo laplaciano, e que somente o último está em conflito com as leis da física atômica.” (FOCK *apud* FREIRE JR, 1994, p. 73).

O nosso critério de escolha desta interpretação não esteve, em momento algum, vinculado a crença de ter sido a melhor interpretação. O primeiro fator que influenciou é o mesmo apontado pelo físico Cohen, de que a controvérsia sobre os quanta é mais fecunda quando se conhece a interpretação originária dos pensadores que aderiam a interpretação de Bohr. Por outra parte, a possibilidade de interpretá-la de forma objetiva foi também um fator “privado” que influenciou, em certa medida, na adoção da interpretação.

TRANSMITINDO RESULTADOS DE UMA MEDIDA EM UM CONTEXTO EXPERIMENTAL BEM DEFINIDO

Tendo discutido o problema da medida no contexto da MC e a MQ e apresentado a interpretação que adotaremos neste trabalho, vamos agora discutir. Podemos também, no mesmo espaço ordinário onde hipoteticamente fizemos as medidas referentes ao movimento do planeta, medir a energia de uma partícula quântica no estado fundamental. Em seguida podemos fazer medidas sucessivas, em instantes diferentes, de momento linear e posição e spin, por exemplo. As medidas expressam que as mesmas foram feitas em alguma ordem: por exemplo, energia, momento linear, posição e spin.

Visando refletir sobre o conceito de probabilidade em MQ utilizaremos o contexto experimental para perguntar: o que o físico pretende expressar ao dizer o valor de $|\langle c' | a' \rangle|^2$, onde c' e a' são estados referentes a dois observáveis?

O questionamento visa elucidar o significado da predição probabilística na MQ. O número expresso pelo bra-ket expressa a probabilidade de, uma vez o sistema estando no estado a' , exibir posteriormente o estado c' . É importante destacar que o caráter probabilístico da MQ é válido mesmo para eventos individuais, de acordo com a interpretação de Bohr. É importante, portanto, distinguir a interpretação estatística da interpretação probabilística.

Para melhor compreender o aspecto probabilístico da MQ, mesmo para eventos individuais, recorreremos a um exemplo de como um físico experimental pode proceder para comunicar resultados de suas medidas expressas através de um vetor de estado em termos probabilísticos. Para isso preparemos o sistema sempre no mesmo estado a' (referente, por exemplo, a energia). Em seguida mediremos alguma componente do seu momento angular e obteremos valores diferentes. É preciso, então, fazermos uma estatística uma vez fixada a preparação inicial descrita pelo mesmo vetor de estado. Aqui aparece claramente o aspecto inerentemente probabilístico da teoria quântica, mesmo para eventos individuais. A matriz mostrada a seguir tem portanto elementos que transmitem de forma objetiva resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido. Os bra-kets representados indicam a amplitude de probabilidade de, uma vez preparado o sistema quântico individual no estado a' (no caso, energia) revelar posteriormente a propriedade b' (no caso, uma das componentes de momento angular).

$$|a'\rangle \rightarrow \begin{bmatrix} \langle b'|a'\rangle \\ \langle b''|a'\rangle \\ \vdots \\ \langle b^n|a'\rangle \\ \vdots \end{bmatrix}$$

vetor a na representação b

FÍSICO TEÓRICO SOLICITANDO AO FÍSICO EXPERIMENTAL A DETERMINAÇÃO DO VETOR DE ESTADO $|\beta\rangle$

Faremos, agora, o caminho inverso. Ou seja: construiremos uma situação onde o físico teórico informa o vetor de estado e pede ao experimental que determine as amplitudes de probabilidade visando ter o vetor de estado definido como uma superposição de estados em

termos de probabilidade. Analisaremos também o colapso do vetor de estado e o seu significado físico de acordo com a interpretação de Copenhague. O que se pretende é oferecer informações acerca do estado beta (desconhecido) compatível com esta preparação. Neste exemplo, finalmente, aparecerá aquela que nos parece a propriedade mais fundamental da MQ: a superposição de estados quânticos. O que significa, a propósito, preparar um sistema físico no estado beta descrito a seguir?

$$|\beta\rangle = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 c_{ij} |a_1^i, a_2^j\rangle$$

$$|\beta\rangle = c_{11} |a_1', a_2'\rangle + c_{12} |a_1', a_2''\rangle + c_{13} |a_1', a_2'''\rangle + c_{21} |a_1'', a_2'\rangle + c_{22} |a_1'', a_2''\rangle + c_{23} |a_1'', a_2'''\rangle$$

Note-se que estando o sistema no estado $|\beta\rangle$ os coeficientes c_{ij} medem as amplitudes de probabilidades de se medir as grandezas 1 e 2. Os a_1' e os a_2'' representam os espectros (autovalores) dos observáveis compatíveis genéricos A_1 e A_2 , respectivamente. Os coeficientes que medem as amplitudes de probabilidade devem ser obtidos no laboratório por uma análise estatística conforme ilustrada na seção 1. Os espectros dos observáveis correspondem aos autovalores dos operadores hermitianos que descrevem os observáveis em pauta, no caso a energia e uma componente do momento angular, respectivamente, só para fixar idéias. Mas afinal de contas, o que há de tão distante do processo de medida em MQ em relação a MC? A resposta está no fato de que antes da medida o estado $|\beta\rangle$ é uma superposição de todos os estados. Nunca vemos isso na escala macroscópica. Exemplificando com uma outra propriedade: uma cadeira, por exemplo, antes de passar por um processo de medida de posição tem, de fato, uma posição bem definida. Mas o elétron, por exemplo, ao contrário, pode estar num estado de superposição e não estar em lugar algum bem definido. É importante frisar que esta indefinição nada tem a ver com a nossa falta de conhecimento. Na interpretação de Copenhague o vetor de estado contém todas as informações do sistema. A previsibilidade da teoria está em plena concordância com os resultados experimentais. É importante frisar que antes da medida o vetor de estado $|\beta\rangle$ é definido como uma superposição de vários estados, mas que, após realizada a medida, poderemos ter o objeto quântico apenas no primeiro estado que aparece no somatório ou ainda como uma superposição de outros possíveis estados. Este fenômeno, essencialmente quântico, é conhecido como colapso do vetor de estado.

IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA

O impacto científico, tecnológico e filosófico que a Física Quântica trouxe para a cultura do século XX e XXI tem, naturalmente, implicações para o ensino. A discussão central que propomos neste trabalho reflete a nossa posição de que o entendimento da MQ deva ocorrer colocando-se o aluno, desde o início, em contato com a nova MQ (isto é, a MQ posterior a 1925), com particular ênfase no PM, em vez de valorizar o processo de construção da velha MQ. Isto corresponde a trabalhar com a MQ sem passar por sistemas semi-clássicos, eliminando assim os elos de analogia com a MC.

Se levarmos em conta que a Física lida com a medida e com a predição dos valores dessas medidas, é natural desejarmos que a compreensão do PM ocorra também no estudo da MQ, a fim de permitir a compreensão do quão distante conceitualmente são os processos de medidas que advém da MC e MQ. Espera-se que munido deste entendimento o aluno possa melhor apropriar-se de uma aquisição científica que marcou o século XX e que continua funcionando com êxito no século XXI.

REFERÊNCIAS

- BOHR, N. **Atomic Physics and Human Knowledge**. New York: J. Wiley e Sons, 1958. Ed. Brasileira Física atômica e conhecimento humano – ensaios 1932-1957. Rio de Janeiro: Contra Ponto, 1995.
- CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JR., O.; SILVA, J. L. Enfatizando a aprendizagem significativa do aspecto preditivo da Mecânica Quântica no Ensino Médio. **Investigação em Ensino de Ciências**, 3(1), pp. 75-86, 2008.
- CARVALHO NETO, R. A. **Aspecto Preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica**: Uma Proposta Teórico-Metodológica para Alunos do Ensino Médio. 2006. Dissertation (Master's in Teaching, Philosophy and Science History) – Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. **Learning quantum mechanics**. In: Proceedings of the International Workshop in Research in Physics Learning, Theoretical Issues and Empirical Studies. DUIT, R., GOLDBERG, F., NIEDDERER, H. (Eds), 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.
- FREIRE JR, O Sobre o diálogo Fock-Bohr. **Perspicillum**, v.8, n.1, p.63-84,nov.1994
- FREIRE JR, Olival et al. Introducing Quantum Physics in Secondary School. **Proceedings of the Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference**. Vol. 1, pp. 412-419. Minneapolis, 1995.
- FREIRE JR., O. **David Bohm e a controvérsia dos quanta**. Campinas: CLE – Unicamp, 1999.
- FREIRE JR., O; CARVALHO NETO, R.A. **O universo dos quanta**: uma breve história da Física Moderna. São Paulo: FTD, 1997.
- GRECA, I. M. **Construindo significados em mecânica quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física geral**. 2000. Tese (Doutorado em Física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- GRECA, I. M; FREIRE JR, O. **Ênfase conceitual e interpretações no ensino da Mecânica Quântica** (2009).
- GRECA, I. M, HERSCOVITZ, V. E. **Mecânica Quântica e intuição**. In: PESSOA JR, O. (Org.) Fundamentos da Física 2 - Simpósio David Bohm. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2001.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 9-35, 2005.
- PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria de Física, 2003.
- TONOMURA, A.; ENDO, J.; MATSUDA, T.; KASAWASAKY, EZAWA, H. "Demonstration of Single-Electron Buildup of an Interference Pattern". **American Journal of Physics**, 57, pp. 117-120, 1989.
- VIANA, J. D. M. **Notas de Aulas de Mecânica Quântica**, UFBA, 2011.