

Descrição Física da Realidade e o Princípio de Incerteza: livros didáticos e vieses filosóficos.

José Bento Suart Júnior¹ (PG)*
Sílvia Regina Quijadas Aro Zuliani² (PQ)

1-Pós Graduação em Ensino para a Ciência – Faculdade de Ciências – Unesp – Campus Bauru
2-Departamento de educação – Faculdade de Ciências – Unesp Campus Bauru

Palavras-Chave: Heisenberg, Princípio de Incerteza, Livro Didático.

Resumo: No presente trabalho verificam-se as concepções contidas em livros didáticos iniciais de Química do nível superior sobre o Princípio de Incerteza. As concepções encontradas são então confrontadas com as origens do desenvolvimento conceitual do referido princípio assim como suas conseqüências filosóficas com relação à natureza da matéria e da teoria Mecânica Quântica.

Introdução

A Química estuda a natureza no que diz respeito à sua constituição e reatividade. Muitas vezes o conhecimento da natureza através dos olhos da Química encontra-se intimamente ligado a fenômenos de ordem atômica, mais especificamente, da natureza quântica das partículas fundamentais. Podemos perceber que no Ensino de Química, os conteúdos de quântica são intrínsecos aos conteúdos iniciais de estudo. Os estudos em Química iniciam-se a partir dos modelos atômicos e natureza da matéria, os quais subsidiarão a compreensão de outros fenômenos.

A transposição didática do modelo atômico clássico para o modelo probabilístico atual está fundamentada em 3 conceitos chaves: a Superposição de Estados, a dualidade partícula-onda e o Princípio de Incerteza de Heisenberg. (GRECA et al., 2001)

Ao observarmos a apresentação do Princípio de Incerteza nos livros didáticos de Química iniciais do curso superior verificamos diferentes abordagens existentes. Selecionamos dois excertos extraídos de dois livros usados tradicionalmente nos cursos iniciais de licenciatura e bacharelado em Química.

O ponto crucial do princípio da incerteza é que, para se saber algo sobre a posição e o momento de uma partícula, temos de interagir de qualquer maneira com esta partícula.

[...] Nenhum instrumento pode “sentir” ou “ver” um *elétron sem influenciar intensamente* o seu movimento. Se, por exemplo, construíssemos um “supermicroscópio” imaginário para localizar um elétron, teríamos de usar uma radiação com um comprimento de onda muito menor do que o da luz. [...] O supermicroscópio imaginário deveria, por isso, usar raios x ou γ . Mas a energia destas radiações é tão grande que modificaria a velocidade e conseqüentemente, o momento do elétron, numa quantidade grande e incerta. (RUSSEL, 1994, p.244)

A dualidade onda-partícula não somente mudou nosso entendimento sobre radiação eletromagnética, como também devastou os fundamentos da física clássica. Na mecânica clássica, uma partícula tem uma **trajetória** definida, ou o caminho onde a localização e o momento linear são especificados a cada instante. Por outro lado, não podemos especificar a localização precisa de uma partícula se ela se comporta como onda [...] Uma partícula com um momento

linear preciso tem comprimento de onda preciso: mas como não tem sentido falar da localização de uma onda, não podemos especificar a localização da partícula que tem um momento linear preciso. (ATKINS e JONES, 2006 p. 142)

Ambas as citações contêm elementos do desenvolvimento do Princípio em suas raízes, mas não suas conseqüências filosóficas quanto à teoria e quanto ao paradigma da construção da ciência, o que se revela uma importante ruptura com relação ao conhecimento advindo de uma ciência há muito fundamentada e ainda observada como produto acabado.

Iniciamos então uma discussão acerca das origens do referido princípio e de suas conseqüências sobre os modelos de ciência existentes.

O Momento Histórico

Para compreendermos o desenvolvimento proposto por Heisenberg necessitamos verificar o contexto no qual este estava imerso quando da enunciação de sua teoria.

Entre os anos de 1925 e 1927, Heisenberg, Born e Jordan formularam uma Teoria Quântica Matricial, enquanto Dirac e Schrödinger também formularam suas versões. As três propostas eram, no entanto, equivalentes conforme demonstrado pelo próprio Schrödinger.

Ao explicar o movimento dos elétrons no átomo Erwin Schrödinger elabora a equação que leva o seu nome. Um estado quântico é descrito pelas funções complexas Ψ que são soluções da equação de Schrödinger. Esta equação pode ser escrita como:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi \quad (1)$$

A interpretação dada a esta equação por Max Born em 1926 trouxe então novas abordagens à Física, propondo uma descrição probabilística em detrimento de uma visão determinística.

Na interpretação de Born, as soluções da equação de Schroedinger fornecem probabilidades de localização dos elétrons, e não mais posições bem definidas. Nesta os módulos quadrados dos coeficientes das equações de autovalores ($|c_i|^2$) representam a probabilidade de obtermos um valor a_i para a grandeza associada ao operador A .

Heisenberg contribuiu definitivamente para esta interpretação em 1927, ao demonstrar as limitações do uso de conceitos clássicos com suas relações denominadas “Princípio de Incerteza de Heisenberg”.

O princípio de incerteza, ou indeterminação, tem suas origens na teoria de Dirac-Jordan. Dirac já havia enunciado que na teoria quântica só era possível dar valores numéricos à somente uma de duas variáveis conjugadas. Heisenberg investigou a relação quantitativa entre os valores teoricamente permitidos para estes valores, ou seja, a relação estatística entre os valores destas grandezas. O que Heisenberg encontra é a relação:

$$\delta q \delta p = \frac{h}{2\pi} \quad (2)$$

No entanto ele se questiona se esta restrição, limitação recíproca da precisão é meramente uma restrição imposta pelo formalismo matemático ou se é reflexo de um estado mais profundo das coisas (JAMMER, 1966).

Na procura por um entendimento intuitivo das relações matemáticas encontradas encontram-se duas interpretações com naturezas e conseqüências filosóficas distintas para o Princípio de Incerteza. Historicamente estas diferem no tempo, mas podem ser encontradas em *The Physical Principles of Quantum Theory* fazendo parte de um mesmo corpo de texto ao qual Heisenberg dá o nome de Crítica dos Conceitos Físicos da Teoria Corpuscular da Matéria.

Para compreendermos as limitações e conseqüências de cada modelo precisamos antes compreender a diferenciação entre ontologia e epistemologia o que faremos utilizando o conceito em discussão, o qual é referido ora como incerteza ora como indeterminação. Certeza ou incerteza é uma propriedade do nosso conhecimento sobre as coisas, uma propriedade epistemológica. Determinismo ou indeterminismo é uma propriedade do mundo das coisas, uma propriedade ontológica (SILVEIRA, 1993).

Ao observarmos a construção da ciência de seu ponto de vista filosófico verificamos então o embate ao qual a ciência se submete quando da formulação da teoria quântica, sendo este relativo exatamente à natureza desconhecida da matéria (ontologia), contra as limitações do conhecimento humano acerca dela (epistemologia) cujo centro se encontra nos reflexos da enunciação do princípio de incerteza.

A Descrição Física da Realidade e a Mecânica Quântica

A ciência parece fundamentar-se durante o Renascimento e a Revolução Científica, e busca então uma estruturação para seus questionamentos, uma natureza para esta atividade, elementos que a fundamentem e que a caracterizem. O “Método Científico”, baseando-se na dialética filosófica, procura no empirismo outros elementos e parece então encontrar a estrutura necessária para sua lógica. Segundo Chalmers (1995, p.23) numa concepção de senso comum bem aceita:

Conhecimento científico é conhecimento provado. As teorias científicas são derivadas de maneira rigorosa da obtenção dos dados da experiência adquiridos por observação e experimento. A ciência é baseada no que podemos ver, ouvir, tocar, etc.

Nesta estrutura, o método concebe os pressupostos determinantes na busca pela “verdade”. Podemos definir, dentro de um âmbito de senso comum, o método como o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo – conhecimento válido e verdadeiro -, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista.

Ainda que rudimentares, frente às teorias atuais relativas ao método, estas surgiram na antiguidade clássica, em conseqüência dos questionamentos relativos à natureza propiciados pela filosofia. Segundo Laudan (2000, p. 26):

Se é legítimo dizer que a ciência e a filosofia modernas encontram suas raízes na Antiguidade, não é de surpreender que a Grécia também tenha produzido as primeiras teorias coerentes sobre o método científico.

Contudo podemos colocar o Renascimento como o marco para o real nascimento do Método. Dentro da estrutura do Renascimento podemos definir uma revolução científica, em que a ciência toma corpo e consigo o Método também.

Elemento importante nesta estrutura, torna-se a matemática, que passa de mero instrumento a corpo de significado, essencialmente a partir do desenvolvimento do modelo astronômico Copernicano. Segundo Henry (1997, p. 20):

A “matematização da natureza”, que foi considerada um elemento importante da revolução científica, em geral era atribuída a uma formidável mudança no sistema metafísico que endossava todos os conceitos do mundo, introduzindo maneiras “platônicas” ou “pitagóricas” de ver o mundo em substituição à metafísica aristotélica da filosofia natural medieval.

A perspectiva matemática tomou então uma natureza realista, sendo que a análise matemática revelaria como as coisas deveriam ser, pois se a teoria fosse verdadeira os cálculos funcionariam.

Duas figuras se destacam dentro da Revolução Científica propiciada pelo Renascimento, destaque tal que se concebe dada a contribuição para o corpo teórico atribuído ao método, Bacon e Descartes. Bacon defendia o indutivismo, enquanto Descartes, fundamentou o método hipotético-dedutivo. O Método Indutivo consiste em um número de casos particulares derivar leis gerais ou princípios. Este não era, decididamente, um procedimento novo no século XVII. Já o método desenvolvido por Bacon baseava-se no entendimento das formas, as quais eram de “natureza simples”. Segundo Bacon, a natureza seria deveras simples, consistindo num conjunto básico de formas cuja descoberta tornaria possível o entendimento da multifacetada complexidade da superfície do mundo (Collinson, 2006). O procedimento indutivo baconiano configuraria em uma tabela de casos de presença da natureza que deveria enfrentar a experimentação e a refutação crítica, sendo que só então poder-se-ia iniciar a interpretação. Já o Método Hipotético Dedutivo consiste na elaboração de hipóteses, sua refutação à partir da experimentação e conseqüente conclusão. Segundo Henry (1997, p.32):

O método de Descartes o conduziu a uma nova metafísica, que forneceu a base para um novo sistema da física, a qual, por sua vez tornou-se a mais influente das novas filosofias “mecânicas”. Seu sistema final, embora fizesse menos uso da matemática, sendo muito mais especulativo e qualitativo, foi sem dúvida desenvolvido a partir do empenho inicial em conhecer o mundo físico em termos matemáticos.

A presença de um conhecimento empírico favoreceu a divisão de três conceitos fundamentais, Deus, Mundo e Eu, ou a separação entre “coisa pensante” e “coisa extensa”. A partição cartesiana conduziu à constituição de um realismo metafísico com relação à “coisa extensa”: o mundo, as coisas com extensão, “existe”. No entanto o realismo metafísico difere do realismo prático, sendo que este assume que haja afirmações que possam ser objetivadas, tal que, nossas experiências cotidianas consistem em tais asserções. Já o realismo dogmático não admite um mundo material com assertivas que não possam ser objetivadas, e desta forma se tornou uma condição necessária para o desenvolvimento da ciência (HEISENBERG, 1981). Segundo Heisenberg (1981, p.65):

Foi somente com a teoria quântica que pudemos aprender que uma ciência exata é possível sem que se aceite o realismo dogmático. Quando Einstein criticou a teoria quântica, ele o fez com base no realismo dogmático. Essa é uma atitude natural. Todo cientista que faça trabalho de pesquisa sente estar procurando por algo que é objetivamente verdadeiro.

A estruturação do método e suas conseqüências no desenvolvimento científico dão corpo à uma visão determinista do mundo, que teve fortalecimento quando da fundamentação da Mecânica Newtoniana, já que esta permitia prever estados futuros, ou ainda projetar estados passados de um sistema se conhecidos fossem, as leis que regem as propriedades deste estado e os valores da posição e energia num dado instante. Podemos associar esta visão à Laplace, que descreveu este problema em sua obra sobre probabilidades. Em sua definição, supondo uma inteligência suficientemente grande (demônio de Laplace), que conhecesse todas as forças da natureza e o estado em um dado instante de todo os objetos, nada seria incerto à esta, de tal forma que fica implícito que até mesmo o comportamento humano seria então regido por leis físicas. Esta visão abrange todas as ciências até a segunda metade do século XIX.

A mecânica de Newton, assim como todas as outras partes da física clássica, construídas segundo o modelo daquela mecânica, tiveram como ponto de partida a hipótese de que se pode descrever o mundo sem fazer qualquer menção à Deus ou a nós mesmos. Essa possibilidade logo pareceu ser uma condição necessária para a ciência natural em geral (SILVEIRA,2003).

Os estudos relativos à estrutura da matéria, entretanto, acabaram levantando aspectos adversos desta descrição física da realidade, tal como a dualidade partícula-onda e ainda assim, verifica-se o desenvolvimento de elaborados aparatos matemáticos antecidos por postulados que vão de encontro a uma interpretação sólida da realidade.

Com o estabelecimento da teoria da transformação estatística o formalismo não relativístico da mecânica quântica estava completo em todos os seus pontos essenciais. Mas um formalismo, ainda que completo e logicamente consistente, não é uma teoria física. Para atingir este status, ou uma correlação epistêmica, alguns dos símbolos devem conter uma interpretação operacional (JAMMER, 1966).

No entanto, termos como localização, velocidade, órbita ainda eram importantes na representação do formalismo, ainda que não pudessem ter seus significados clássicos. Ou seja, a Mecânica Quântica começava a operar com uma linguagem própria. Segundo Heisenberg (1981, p. 11):

Não é surpreendente que a nossa língua deva ser incapaz de descrever os processos que ocorrem dentro dos átomos, pois, como já se observou, foi inventada para descrever as experiências da vida diária, e estas são apenas constituídas por processos que envolvem excessivamente grandes números de átomos.

Ainda que sustentada pelo desenvolvimento matemático, a apresentação dos resultados e das interpretações ao mundo não científico recai sobre a utilização da linguagem cotidiana, a qual é concomitantemente construída com a ciência e transformada por esta, quando dentro de seus domínios.

Quaisquer palavras ou conceitos que foram criados no passado frutos da interação do homem com o mundo, não são, de fato, precisamente definidos no que se refere a seu sentido; isso quer dizer que não sabemos exatamente quão longe palavras e conceitos nos ajudarão a achar nosso caminho no entendimento do mundo (HEISENBERG, 1981, p.72).

A mecânica quântica revela então as limitações de uma observação crítica, ou ainda da compreensão intuitiva de uma descrição física completa da realidade.

Aqui não se tem, de começo, nenhum critério simples para se correlacionar os símbolos matemáticos aos conceitos da linguagem cotidiana; e a única coisa que sabemos, como ponto de partida, é que os conceitos comuns não são aplicáveis ao estudo das estruturas atômicas (HEISENBERG, 1981, p. 134).

Cabe ressaltar que, dentro destas limitações, o Princípio de Incerteza corroboraria as limitações de uma descrição exata da realidade através da matemática, ao impor limitações na determinação de valores às variáveis físicas. Para Jammer (1966, p.325):

O formalismo da mecânica quântica, ele fundamentado, que opera em espaços abstratos multidimensionais e emprega não-comutativas quantidades, não admite descrições usuais de espaço-tempo ou conexões causais de fenômenos físicos.

O que observaremos a seguir é que ele também deteria o cerne do colapso do realismo dogmático, ou ainda da visão determinista laplaciana, da mecânica newtoniana, no que se refere à sua interpretação metafísica, ao corpo da teoria, de sua interpretação intuitiva ao limitar muito mais que o conhecimento de valores discretos de variáveis, mas colocar em xeque o conhecimento sobre a natureza e a natureza do conhecimento, eixo orientador dos debates travados entre a Escola de Copenhague e os seguidores de Einstein.

O Desenvolvimento Conceitual do Princípio de Incerteza: “Crítica dos Conceitos Físicos da Teoria Corpuscular da Matéria”

Como exposto anteriormente Heisenberg questiona se a Incerteza seria uma consequência matemática ou se seria possível uma interpretação intuitiva. Chibeni (2005) ressalta a coexistência de três interpretações. Historicamente elas se apresentam em momentos distintos, mas tomam parte de um mesmo corpo de texto (The Physical Principles of Quantum Theory) como apresentaremos.

A discussão proposta por Heisenberg (1949) se inicia com um chamado às relações de incerteza. Neste ponto é colocada a limitação das imagens concebidas para os conceitos evocados pela Mecânica Quântica, os quais fazem parte da realidade comum:

Os conceitos de velocidade, energia, etc., têm sido desenvolvidos de simples experimentos com objetos comuns, nos quais o comportamento mecânico dos corpos macroscópicos pode ser descrito por algumas palavras. Estes mesmos conceitos tem sido trazidos para o elétron, desde que em certos experimentos fundamentais elétrons tem mostrado comportamento mecânico semelhante à objetos de experimentos comuns.

[...] Esta similaridade existe em alguns casos especiais, nos quais a teoria corpuscular deve ser limitada. Segundo Bohr, esta restrição pode ser deduzida do princípio de que na física atômica pode-se enxergar em termos de partícula ou onda equivalentemente. (HEISENBERG, 1949, p.13)

Numa primeira abordagem então, a incerteza é colocada como uma característica essencial advinda das consequências da adoção de uma formulação ondulatória para a descrição do elétron. Nesta formulação, podemos descrever o

comportamento de um elétron através de uma onda, conseqüentemente um pacote de onda também é solução para este problema. Segundo Heisenberg (1949, p.14):

A velocidade do elétron corresponde à do pacote de onda, mas esta não pode ser exatamente definida, devido à difusão ocorrida no espaço. Esta indeterminação deve ser considerada como uma característica essencial do elétron, e não uma evidência da inaplicabilidade da visão ondulatória.

Um pacote de onda pode ser obtido através da superposição de ondas planas sinusoidais de comprimento de onda distribuídos em uma determinada faixa (COHEN-TANNOUDJI et al., 1977).

O princípio de superposição de estados garante que toda combinação linear de ondas planas também é uma solução da equação.

Á partir deste formalismo (COHEN-TANNOUDJI et al., 1977) verifica-se agora o que ocorre ao somarmos ondas planas. Tomadas três ondas planas (um caso mais simples do que a soma de infinitas ondas), seus vetores de onda serão k_0 , $k_0 - (\Delta k/2)$ e $k_0 + (\Delta k/2)$ e suas amplitudes serão proporcionais, sendo respectivamente, 1, $1/2$ e $1/2$.

Nesse caso, a função tem seu máximo na origem, quando as ondas estão em fase e há interferência construtiva. Ao mover-se no eixo x a função decresce, pois as ondas estão cada vez mais em oposição de fase, conforme a figura abaixo:

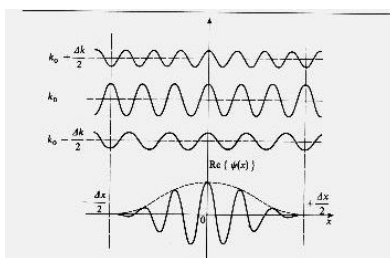


Figura 1. Superposição de ondas planas. Extraída de COHEN et al., 1977, p.24

Ao somar mais ondas com vetores de onda distribuídos num dado intervalo, gera-se um pico, o que se pode interpretar como uma singularidade, ou seja, um pacote de onda cuja posição se torna conhecida, a onda está localizada e não mais espalhada pelo espaço. Todavia, o aumento da precisão na posição acaba por afetar o conhecimento do momento, advindo do vetor de onda k . Ou seja, o tratamento matemático clássico demonstra de forma clara a ocorrência do princípio de incerteza também quando se trata ondas planas. Porém o ponto de partida deste desenvolvimento é a associação a uma partícula deste pacote de ondas, de onde decorre a interpretação quântica do fenômeno.

Esta relação de incerteza especifica os limites com os quais a visão corpuscular pode ser aplicada. Qualquer uso das palavras “posição” e “velocidade” com precisão maior que a dada pela equação (1) é tão inútil como o uso de palavras cujo sentido não é definido. (HEISENBERG, 1949, p.15)

Chibeni (2005) define esta versão como ontológica, pois “ela diria respeito a uma indeterminação intrínseca aos entes físicos” (p. 183). Ou seja, aqui a natureza é indeterminada, o que conseqüentemente gera incerteza nos dados obtidos através da experimentação. Mas Chibeni enfatiza que os fenômenos ainda que verifiquem o aspecto ondulatório da matéria, o que justifica a abordagem, coexistem com outros que sugerem a natureza corpuscular dos entes quânticos (fato, estar contido em uma crítica

à visão corpuscular da matéria). O principal argumento que solucionaria esse problema, ou seja, enxergar a matéria como pacotes de onda que quando concentrados formam singularidades, não está contida no formalismo de Schrödinger, estando o mesmo formulado em três dimensões apenas para um elétron. O que significa uma realidade além de três dimensões? O conflito em questão ainda recai sobre o “problema da medida” ou mais geralmente no “colapso da função de onda” não citado no escopo deste trabalho.

Outro problema pode ser percebido quando consideramos ainda a visão de ciência abordada pelo positivismo. As questões relativas ao método, o qual parecia estar definido nas visões cartesiana e baconiana, retornaram somente no século XIX com Comte e o positivismo. Segundo Comte a ciência deveria ocupar-se exclusivamente com a “*descoberta de leis descritivas dos fenômenos, devendo, ao mesmo tempo, renunciar prudentemente a qualquer tentativa de descrever causas eficientes ou “modos de produção”*” (Laudan, 2000, p. 52). Defendendo uma ciência fenomenalista o positivismo então desliga a ciência de suas questões “existenciais”, definindo estas como metafísicas, as quais não fazem parte desta “ciência instrumentalista”.

Segundo Pessoa Júnior (2005, p.102):

[...] o *positivismo* não envolve apenas uma tese única, mas consiste de quatro afirmações principais: (i) *Descritivismo*: só faz sentido atribuir realidade ao que for possível descrever, observar. (ii) *Demarcação*: teses científicas são claramente distinguidas de teses metafísicas e religiosas, por se basearem em, “dados positivos” (são verificáveis). (iii) *Neutralidade*: o conhecimento científico deve ser separado de questões de aplicação e de valores. (iv) *Unidade da ciência*: todas as ciências têm um método único, baseado no empirismo e na indução.

Cabe aqui colocar que a ontologia no pensamento filosófico positivista é experimentalmente inquestionável, o que a inclui no domínio da metafísica. Desse modo, o Princípio de Incerteza seria de domínio da metafísica. As conseqüências filosóficas da mecânica quântica são evidentes. Einstein e Bohr travaram grandes discussões acerca do assunto, que culminaram no problema EPR, na teoria das variáveis ocultas de Bohr e nas Desigualdades de Bell como citado. Ainda que as discussões tenham culminado em uma outra abordagem da teoria quântica, a principal questão centrava-se no Princípio de Incerteza inadmissível a Einstein. Admitir que seja fisicamente impossível conhecer um sistema em sua totalidade com exatidão acaba por contrapor a ciência à sua principal busca *a priori*, fruto do pensamento realista dogmático, uma teoria geral determinística, capaz de prever a natureza, como proposto por Laplace, até mesmo para o comportamento humano.

Verificamos ainda que o ponto de partida desta discussão é o mesmo utilizado por Atkins e Jones (2006) em seus escopo sobre o conceito, contido no excerto apresentado acima.

Num segundo momento, na seção intitulada “Ilustração das Relações de Incerteza”, encontra-se a evolução das relações de incerteza a partir de outro pressuposto, cujas conseqüências recairão sobre preceitos epistemológicos como veremos.

A discussão parte supondo-se um elétron livre cuja velocidade seja conhecida, mas cuja posição seja completamente desconhecida. Como conseqüência da mensuração da posição, obter-se-ia uma alteração do momento tal que o conhecimento sobre movimento do elétron estaria restrito às relações de incerteza. Segundo Heisenberg (1949, p. 20):

Isto pode ser expresso em termos concisos e gerais dizendo-se que todo experimento destrói algum conhecimento do sistema do qual este foi obtido por um experimento anterior.

Diversos exemplos de experimentos que destruiriam informações sobre o sistema estão contidos no corpo do texto, contudo nos ateremos ao primeiro exemplo, o qual, historicamente é anterior ao ontológico, mas que é geralmente encontrado nos livros didáticos, tal como na citação encontrada em Russel (1994) contida no início deste texto.

O experimento apresentado é o da medição da posição de um elétron através de um microscópio de raios gama.

De acordo com as leis ópticas, o espalhamento do raio gama em questão é dotado de imprecisão dada por:

$$\partial x = \frac{\lambda}{\text{sen}\varepsilon} \quad (3)$$

Na qual, ∂x é a imprecisão da medida, λ o comprimento de onda e ε é o ângulo de possível espalhamento dentro da captura do microscópio, sofrido pelo feixe.

Ao ser espalhado o fóton confere um momento da ordem de h/v . A direção do fóton fica indeterminada dentro do ângulo de espalhamento, o que provoca incerteza no momento:

$$\partial p_x = \frac{h}{\lambda} \text{sen}\varepsilon \quad (4)$$

Demonstrando Heisenberg que após o experimento

$$\partial x \partial p_x \approx h \quad (5)$$

Nesta versão então as relações de Heisenberg não expressariam uma característica física dos objetos “[...] mas uma característica de nosso conhecimento acerca dos objetos, já que outros fatos ligados às situações experimentais contribuiriam para esta incerteza” (CHIBENI, 2005, p. 184).

Segundo Chibeni (2005):

[...] o que Heisenberg faz é evocar os alegados limites do nosso conhecimento possível dos valores precisos simultâneos de pares de grandezas conjugadas para justificar a falta desses valores no formalismo quântico[...]bem como, em um nível mais físico e intuitivo, a coexistência dos aspectos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos. (p.185)

Neste caso, encontramos uma natureza determinada, no entanto o conhecimento sobre os dados é incerto, neste caso, devido á influência do experimento na medida.

A presente versão permite uma série de críticas de acordo com Chibeni. Defende-se aqui uma generalização de um princípio físico através de uma situação experimental particular. As generalizações empíricas tornam-se aceitáveis quando compreendem casos semelhantes. Falta ainda um suporte teórico consistente para essa defesa e generalização, o “quantum de ação”.

Sendo esse um experimento de pensamento (*gedank-experiment*), Popper defende que estes são válidos para críticas a teorias, mas não em suas defesas (CHIBENI, 2005). O autor ainda ressalta uma grave falha conceitual nessa versão: o aparato experimental não assume a impossibilidade de mensuração simultânea dos pares de grandezas conjugadas.

Ainda dentro deste corpo de texto, Heisenberg aponta para uma versão das relações de incerteza que pode ser deduzida sem o uso explícito de uma visão ondulatória, obtida do esquema matemático da teoria quântica e de sua interpretação.

Esta visão, historicamente é posterior às duas antevistas. Em seus artigos, Heisenberg faz uso do termo “desvio padrão”, que é uma noção estatística. Desvio padrão é uma quantidade estabelecida quando se trata um conjunto de dados (CHIBENI, 2005).

Isto leva a interpretação estatística da função de onda, proposta por Max Born, onde a probabilidade de se encontrar uma partícula quântica é dada pelo módulo quadrado da função de onda. Para Chibeni (2005) “a interpretação remete naturalmente a uma situação em que se considera não um objeto individual, mas um conjunto, ou ensemble, de objetos preparados num mesmo estado quântico” (p. 185).

Dessa forma, a incerteza é “um limite mínimo para a dispersão estatística nos resultados de medida de grandezas conjugadas” a qual se deve “a uma dispersão mínima ineliminável, radicada na teoria quântica” (CHIBENI, 2005, p.186).

É interessante perceber que Schrödinger demonstra que a incerteza, tomada nessa concepção, é parte integrante das equações para dois operadores auto-adjuntos:

$$(\Delta A)^2 (\Delta B)^2 \geq \left| \left\langle \frac{1}{2}(AB - BA) \right\rangle \right|^2 + \left(\frac{1}{2} \langle AB + BA \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle \right)^2 \quad (6)$$

Nesse caso, o comutador “AB-BA” é $ih/2\pi$ enquanto para estados como o estudado por Heisenberg o último termo quadrático é zero gerando a versão estatística da relação do princípio de incerteza:

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{h}{4\pi} \quad (7)$$

Chibeni (2005) aponta que “a relação estatística e sua demonstração independem completamente não apenas de qualquer hipótese acerca da natureza do objeto quântico, como também acerca de eventuais limitações de nosso conhecimento a seu respeito” (p. 187).

Ainda que defendida, justificada pela validade empírica dos meios estatísticos, a presente interpretação não finaliza os debates quanto à natureza da teoria. Haja vista, a comunidade científica se dividiu em duas vertentes da teoria, considerando uma delas que a teoria estaria incompleta, enquanto o “quantum de ação” justificaria toda a natureza peculiar do tratamento matemático e suas conseqüências.

Uma breve discussão e possíveis conclusões

Verificamos acima que não só o desenvolvimento da mecânica quântica apresenta sérias conseqüências com relação à estruturação da ciência. Importante

também é observar que o princípio filosófico da Incerteza proposto por Heisenberg, ao ser enunciado em três diferentes vias abarca diferentes problemas para esta estruturação e de certa forma se encontra nele o cerne das discussões acerca da interpretação do formalismo matemático.

As questões relativas à linguagem são de extrema importância no tocante às imagens propostas na Mecânica Quântica. A concomitância das visões de partícula e onda propicia dificuldades na disseminação desta teoria. Considerando o ensino de mecânica quântica como compreender a co-existência destas duas definições ao supor-se que o elétron possui caráter dual¹? Afinal, seria o mesmo que admitir que este seja contínuo e descontínuo, que possua trajetória e que esteja disperso no espaço. Segundo Johnston et al. (1998), a dificuldade de compreensão por parte dos alunos se deve às imagens preconcebidas destes dois conceitos:

Tudo isto traz grandes implicações na aprendizagem da mecânica quântica para alunos. Todos os modelos mentais com os quais eles já trabalharam antes, onda ou partícula, são modelos pictóricos. (p. 431, tradução livre)

Fica claro ainda como colocado pelo próprio Heisenberg que as dificuldades vêm não só das imagens, mas da linguagem cotidiana que é adotada pela ciência na descrição de suas teorias e resultados.

No entanto, enfatiza-se aqui um ponto em particular. No início do corpo deste texto foram selecionadas duas apresentações do Princípio de Incerteza contidas em livros de Química Geral. Ao compararmos os excertos com o desenvolvimento histórico do tema em questão verificamos que não estão contidas nos fragmentos as conseqüências advindas da adoção de uma visão ontológica ou epistêmica da teoria, fundamentalmente, na abrupta ruptura que ocorre com a descrição dogmática da realidade.

Recaem então duas perguntas finais, considerando-se as preocupações advindas das pesquisas em ensino de ciências quanto à visão de construção de ciência como fruto do pensamento humano:

1. Os livros didáticos têm viés filosófico claro na abordagem dos conceitos?
2. Os professores teriam claras as conseqüências da adoção do livro didático e deste viés contido em seus textos?

Referências

ATKINS, Peter; JONES Loreta. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3ªed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 914 p.

COHEN-TANNOUJDI Claude.; DIU Bernard; LALOË, Franck. **Quantum mechanics**. v.1, New York: John Wiley, 1977. 914 p.

CHIBENI, Sílvio Seno. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.27, n°2, p. 181-192, 2005.

¹ Na natureza dual do elétron, as duas características, onda e partícula nunca aparecem simultaneamente ao observador. São como faces de uma mesma moeda: se uma é vista a outra não.

COLLINSON, Diané. **50 Grades Filósofos: da Grécia antiga aos século XX**. 3.ed. São Paulo: Contexto, 2006. 287 p.

FREIRE JR, Olival, CARVALHO NETO, Rodolfo Alves. **O Universo dos quanta: uma breve história da Física Moderna**. São Paulo, FTD, 1997. 95 p.

GRECA, Ileana.Maria Rosa, MOREIRA Marco Antônio. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências** – v.6(1), p. 29-56, 2001.

GRECA, Ileana.Maria Rosa, SANTOS, Flávia Maria Teixeira. Dificuldades da generalização das estratégias de modelação em ciências: o caso da Física e da Química. **Investigações em Ensino de Ciências**. V.10, n1. 2005.

GRECA, Ileana.Maria Rosa; MOREIRA, Marco Antônio.; HERSCOVITZ , Victoria Elnecape. Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 23 n.. 4, 2001.

HEISENBERG, Werner. **The physical principles of the quantum theory**. New York, Dover, 1949. 200 p.

HEISENBERG, Werner. **Física e filosofia**. Brasília : Ed. da UnB, 1981. 158.

HENRY, John. **A Revolução Científica e as Origens da Ciência Moderna**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.149 p.

JAMMER, Max. **The Conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1966. 399 p.

JOHNSTON, I.D. CRAWFORD, K. and FLETCHER, P.R.. Students difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, 20:4, 427-446. 1998.

LAUDAN, Larry. Teorias do Método Científico de Platão a Mach. **Cad. Hist. Fil. Ci.** Campinas, Série 3, v. 10, n. 2, p. 9-140, jul.-dez. 2000.

LOPES, Joaquim Bernardino. **Aprender a Ensinar Física**. Fundação Calouste Gulbenkian 2004. 428 p.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antônio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, V.5 (1), p. 23-48, 2000.

PESSOA JUNIOR, Oswaldo. **Conceitos de Física Quântica**, 1ªed. São Paulo: Livraria da Física, 2003. 189 p.

RUSSELL, John Blair. **Química geral** São Paulo: Pearson Education, 1994 tradução e revisão Márcia Guekezian et al).

SILVEIRA, Fernando Lang. Determinismo, previsibilidade e caos. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v10, n.2: p.137-147, 1993.