

A Mecânica Quântica de David Bohm

David Bohm's Quantum Mechanics

Rodrigo Siqueira-Batista*
José Abdalla Helayël-Neto**

A interpretação bohmiana da Mecânica Quântica representa uma das principais alternativas ao modelo hegemônico proposto pela Escola de Copenhague. Apresentar, sucintamente, seus principais aspectos conceituais, é o objetivo do presente artigo.

Bohm's interpretation of Quantum Mechanics appears as one of the main alternatives to the hegemonic model proposed by the Copenhagen School. This work aims at making a concise presentation of the outlines and the main conceptual framework of the approach followed by David Bohm.

Palavras-chave: David Bohm. Mecânica Quântica. Variáveis ocultas.

Key words: David Bohm. Quantum Mechanics. Hidden variables.

1 Introdução

A Mecânica Quântica (MQ) representa um dos principais modelos teóricos para a explicação da realidade física, especialmente nos aspectos relativos à estrutura íntima da matéria (BOHR, 1995; PESSOA JUNIOR, 2000). Sem embargo, a influência da teoria não se restringe ao âmbito da física, podendo-se divisar inúmeras conseqüências filosóficas, dentre as quais as questões (1) da *realidade* do mundo subatômico — esfera ontológica — e (2) da possibilidade de se *conhecê-la* — esfera epistemológica (SIQUEIRA-BATISTA *et al.*, 2003).

Um dos pontos chaves neste último domínio — esfera epistemológica — é a indeterminação das descrições da MQ (HEISENBERG, 1958). Neste sentido, quando são conduzidas certas experiências utilizando-se os princípios teóricos da MQ, torna-se impossível obter uma descrição completa dos fenômenos — ou seja, estes experimentos têm um alcance limitado por algumas particularidades. Como exemplo, pode-se citar o comportamento dos elétrons, que ora se manifestam como se fossem possuidores de uma “natureza ondulatória”, ora como se detentores de uma “natureza corpuscular”.

*Doutor em Ciências. Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Professor Titular do Curso de Graduação em Medicina, Centro Universitário da Serra dos Órgãos (UNIFESO). Professor Adjunto do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências, Centro Federal de Educação Tecnológica de Química (CEFET Química/RJ).

**Doutor em Ciências. International School for Advanced Studies in Trieste, SISSA. Pesquisador Titular, Laboratório de Física Experimental de Altas Energias, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Professor colaborador do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências, Centro Federal de Educação Tecnológica de Química (CEFET Química/RJ).

Além disso, não é possível obter em um único experimento uma informação referente à posição e ao *momentum* de uma dessas partículas, ou seja, em qualquer medida feita sempre haverá uma incerteza, caracterizando o célebre *Princípio da Incerteza* de Heisenberg (CHIBENI, 2005), expresso nos seguintes termos:

$$\Delta x_i \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{e} \quad \Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2},$$

onde

$$\frac{\hbar}{2} = \frac{h}{2\pi},$$

sendo h a constante de Planck; Δx_i , Δp_i , Δt e ΔE designam, respectivamente, as incertezas nas coordenadas de posição, nas componentes do momento, no tempo e na energia.

A visão instaurada pela MQ trouxe especiais problemas às tradições de pesquisa que se ancoravam na investigação das leis deterministas do *mundo objetivo* — ou seja, referida aos processos físicos que têm lugar no espaço e no tempo, como na esclarecedora citação de Laplace: “[...] toda a história do Universo poderia ser conhecida se a posição e a velocidade de uma partícula fossem conhecidas em qualquer instante do tempo” (LAPLACE, 1884).

Tal aspecto — considerado *paradoxal* para a imagem de mundo vigente — concorreu para que a MQ fosse questionada em sua completude, ângulo da célebre polêmica de Einstein e Bohr. De fato, se para Bohr — e demais cientistas da Escola de Copenhague —, a MQ era uma teoria completa em sua proposta de descrição do mundo atômico — ou seja, não haveria como se libertar da incerteza dessas medidas (BOHR, 1995) —, para Einstein, a MQ não passaria de um modelo incompleto, considerando que novas *variáveis ocultas* seriam inseridas na modelação matemática quântica, permitindo refutar o *princípio da incerteza* (neste princípio estava, segundo sua percepção, a “falha” da teoria quântica) — afinal, “Deus não joga dados” (EINSTEIN, 1953).

É neste contexto polêmico que se inscreve a interpretação de Bohm para a MQ — em termos de —, na qual se prevê uma “*descrição causal e objetiva para os fenômenos quânticos*” (FREIRE JUNIOR *et al.*, 1994). Discutir tal proposta é o escopo do presente artigo.

2 A mecânica bohmiana

O ponto de partida para a teoria de Bohm foi a não aceitação das interpretações “clássicas” da MQ, no que se refere às *variáveis ocultas*, como concebido pela Escola de Copenhague. A interpretação bohmiana da MQ não-relativista envolve as *variáveis ocultas*, baseada na existência de partículas descrevendo trajetórias no espaço segundo uma lei de movimento que pode ser obtida a partir da função de onda (BOHM, 1957).

Deste modo, já em 1952, Bohm foi capaz de demonstrar explicitamente que parâmetros poderiam ser introduzidos na mecânica ondulatória não-relativista, tornando a descrição indeterminista em uma determinista (BOHM, 1952A; BOHM, 1952B).

Na proposta bohmiana para a teoria quântica, atribui-se uma ontologia aos sistemas físicos. No caso particular da mecânica quântica não-relativista, os sistemas físicos são compostos por partículas puntiformes que se movem descrevendo trajetórias quânticas no espaço, como uma lei de evolução atribuída às partículas de acordo com a prescrição:

$$m \dot{\vec{x}} = \vec{\nabla} S(t; \vec{x}), \quad (1)$$

onde o ponto sobre o vetor-posição representa a operação de derivada temporal e S parametriza a função de onda, Ψ , de acordo com a decomposição polar

$$\Psi(t; \vec{x}) = R(t; \vec{x}) e^{\frac{i}{\hbar} S(t; \vec{x})} \quad (2)$$

e m é a massa inercial da partícula. Esta função de onda, da mesma forma que na interpretação de Copenhague, satisfaz à equação de Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \quad (3)$$

onde V representa o potencial clássico.

Com a decomposição polar, acima, para Ψ introduzida na equação (2), é possível chegar-se às equações a seguir para R e S:

$$\frac{\partial}{\partial t} S + \frac{(\vec{\nabla} S)^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{(\vec{\nabla} R)^2}{R} + V = 0 \quad (4)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} R^2 + \frac{1}{m} \vec{\nabla} \cdot (R^2 \vec{\nabla} S) = 0 \quad (5).$$

Um passo crucial que marca a singularidade da formulação de Bohm consiste em encarar a equação (4) como uma equação clássica de Hamilton-Jacobi:

$$\frac{\partial}{\partial t} S + \frac{(\vec{\nabla} S)^2}{2m} + Q + V = 0 \quad (6),$$

onde

$$Q \equiv -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{(\vec{\nabla} R)^2}{R} \quad (7)$$

é interpretado como um potencial quântico, ao lado do potencial clássico, V. O caráter quântico de Q fica assinalado pela presença manifesta da constante de Planck em sua expressão.

A partir da identificação da equação (6) como uma equação do tipo Hamilton-Jacobi, pode-se escrever o momento e a velocidade da partícula em termos da fase, S , respectivamente, como segue abaixo:

$$\vec{p}(t; \vec{x}) = \vec{\nabla} S(t; \vec{x}) \quad (8)$$

$$\dot{\vec{x}} = \frac{1}{m} \vec{\nabla} S(t; \vec{x}) \quad (9).$$

Desta forma, o momento, $\vec{p}(t; \vec{x})$, e a $\dot{\vec{x}}(t; \vec{x})$ velocidade, são determinados pelo campo de fase, S , permitindo a obtenção de uma *trajetória bem definida*, a qual se denomina trajetória bohmiana. Conhecendo-se, então, $\Psi(t; \vec{x})$ como dada na equação (2), tem-se que as trajetórias podem ser univocamente determinadas pelas condições iniciais, através de um sistema acoplado de equações diferenciais de primeira ordem, em geral, não-lineares. É este aspecto que confere ao tratamento bohmiano a característica de uma formulação determinística, na qual o *princípio da incerteza* de Heisenberg perde o caráter fundamental presente na interpretação probabilística usual.

É importante ressaltar que a formulação de Bohm — como desenvolvida em colaboração com Hiley e Kaloyerou (1987) — não descarta a equação de Schrödinger, mas a acopla ao conjunto de equações diferenciais de primeira ordem dado anteriormente, conduzindo, então, a um amplo conjunto de equações acopladas (BOHM; HILEY, 1999). Ademais, reescrevendo a função de onda — solução da equação de Schrödinger — estabelece-se analogia com a física clássica, demonstrando que a mecânica newtoniana encontra um tratamento análogo no mundo quântico; de fato, Bohm escreve uma espécie de segunda lei de Newton para uma partícula quântica. Trata-se, em última análise, de uma “recuperação do determinismo próprio à física clássica” (FREIRE JUNIOR *et al.*, 1994).

Cabe ainda destacar que a equivalência entre as abordagens via equação de Schrödinger à Copenhague e via equação de Bohm pode ser claramente ilustrada em sistemas fundamentais como o caso da partícula livre, do oscilador harmônico simples, da partícula sujeita a um poço de potencial unidimensional e da partícula carregada minimamente acoplada a um campo eletromagnético externo. Recomenda-se a consulta aos trabalhos de J. M. F. Bassalo e colaboradores (2003) e de P. R. Holland (1993) para uma apreciação mais minuciosa destes sistemas físicos.

3 Considerações finais

A interpretação de Bohm para a MQ permaneceu no ostracismo por alguns anos. Entre os possíveis motivos para tal situação estavam (1) a potencial *não-localidade* que decorre do emaranhamento e (2) o *ressurgimento do determinismo clássico* — descrição do micromundo utilizando categorias como *casualidade, posição e trajetória*, com um

significado físico “concreto” — que a descrição em termos de variáveis ocultas apresenta (a discussão acerca deste último aspecto, a *trajetória* — a propósito das abordagens de Copenhague e Bohm —, será objeto de trabalho em vias de conclusão – SIQUEIRA-BATISTA *et al*, 2008). Entretanto, mais recentemente, tem se renovado o interesse pela mecânica bohmiana, na medida em que os debates sobre o determinismo permanecem em pauta (ALEKSANDROWICZ, 2007; ATLAN, 2003) e a propriedade de não-localidade já não é mais um problema tão grande para a física — por exemplo, as teorias de cordas (KAKU, 2000) adotadas para a descrição da matéria em sua escala mais fundamental, não são modelos locais no sentido usual do conceito.

As perspectivas para a aplicação da mecânica de Bohm, em diferentes áreas — como a teoria quântica de campos e a física de altas energias, física da matéria condensada, cosmologia quântica e teoria da informação quântica — são notáveis, cabendo, na atualidade, a condução de novas investigações em torno dos seus conceitos, teorias e métodos.

4 Referências

ALEXANDROWICZ, A. M. C. *O paradigma da complexidade no século XXI: da filosofia e ética da biologia a uma evolução antropológica e psicoafetiva em curso*. Tese. Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, FIOCRUZ, 2007.

ATLAN, H. Ruído e determinismo: diálogos espinosistas entre antropologia e biologia. *Maná*, v. 9, p. 123-137, 2003.

BASSALO, J. M. F. *et. al. Tópicos da Mecânica Quântica de de Broglie-Bohm*. Belém: EDUFPA, 2003.

BOHM, D.; HILEY, B. J.; KALOYEROU, P. N. An ontological basis for the Quantum Theory. *Phys Rep*, v. 144, p. 349, 1987.

BOHM, D.; HILEY, B. J. *The undivided universe: an ontological interpretation of quantum theory*. London: Routledge, 1999.

BOHM, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. I. *Phys Rev*, v. 85, p.166-179, 1952a.

_____. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. II. *Phys Rev*, v. 85, p. 180-193, 1952b.

_____. *Causality and Chance in Modern Physics*. Philadelphia: Routledge & Kegan Paul and D. Van Nostrand Company, 1957.

BOHR, N. *Física Atômica e Conhecimento Humano*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

CHIBENI, S. S. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, p. 181-192, 2005.

- EINSTEIN, A. *Elementare Überlegungen zur interpretation der grundlagen der quantenmechanik*. Edinburgh: University of Edinburgh, 1953.
- FREIRE JUNIOR, O.; PATY, M.; BARROS, A. L. R. *David Bohm, sua estada no Brasil e a teoria quântica*. Estud av, v. 8, p. 53-82, 1994.
- HEISENBERG, W. *Physics and philosophy*. New York: Harper Torchbooks, 1958.
- HOLLAND, P. R. *The quantum theory of motion*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- KAKU, M. *Strings, conformal fields and M-Theory*. Springer: Series Graduate Texts in Contemporary Physics, 2000.
- LAPLACE, P. S. *Oeuvres completes*. Paris: Gauthier-Villars; 1884.
- PESSOA JUNIOR, O. *Histórias contrafactuais: o surgimento da Física Quântica*. Estudos avançados, v. 14, n. 39, p.175-204, 2000.
- SIQUEIRA-BATISTA, R. *et. al.* A realidade quântica – notas históricas e apontamentos epistemológicos. *Physicae*, v. 4, p. 33-38, 2003.
- SIQUEIRA-BATISTA, R. *et. al.* A mecânica quântica de David Bohm: implicações epistemológicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2008 (submetido).