

David Bohm e a Mecânica Quântica: o Todo e o Indiviso

Bohmian's Quantum Mechanics

Rodrigo Siqueira-Batista^{*1,2}, Mathias Viana Vicari¹, José Abdalla Helayël-Neto³

¹Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

²Faculdade Dinâmica do Vale do Piranga, Ponte Nova, MG, Brasil.

³Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 03 de abril de 2022. Aceito em 08 de abril de 2022

A visão indeterminista inspirada pela Escola de Copenhague – proposta, em 1927, pelo físico dinamarquês Niels Bohr e que articula o princípio da incerteza de Werner Heisenberg e a equação de onda de Erwin Schrödinger – tornou-se a interpretação hegemônica da Mecânica Quântica (MQ). Albert Einstein adotou uma visão bastante crítica em relação a este modo de descrever os processos atinentes à intimidade da matéria, considerando a MQ uma teoria incompleta. Louis De Broglie, já em 1927, propõe uma concepção alternativa – interpretação da onda piloto –, na qual se considera a MQ uma teoria determinística. Vinte e cinco anos depois, David Bohm desenvolve, na mesma lógica, a Teoria do Potencial Quântico, não-relativística, cujas ideias de destaque incluem as variáveis ocultas e a não-localidade. Com base nessas breves considerações, o presente artigo tem por objetivo (1) apresentar os aspectos essenciais da Interpretação de Copenhague da MQ, (2) criticar tal perspectiva do ponto de vista do paradoxo EPR (Einstein, Podolsky e Rosen) e do “Gato de Schrödinger” e (3) analisar a abordagem matemática e as consequências filosóficas da MQ de David Bohm (MQ-B).

Palavras-chave: David Bohm, Mecânica Quântica, Variáveis ocultas, Não-localidade.

The indeterministic view advocated by the Copenhagen School – proposed in 1927 by danish physicist Niels Bohr and which articulates Werner Heisenberg’s principle of uncertainty and Erwin Schrödinger’s wave equation – has become the hegemonic interpretation of quantum mechanics (MQ). Albert Einstein adopted a very critical view of this way of conceiving the processes related to the intimacy of matter, considering MQ an incomplete theory. Louis De Broglie, in 1927, proposes an alternative conception – interpretation of the pilot wave – in which MQ is considered a deterministic theory. Twenty-five years later, David Bohm develops, in the same logic, the Quantum Potential Theory, non-relativistic, whose prominent ideas include the hidden variables and the non-locality. Based on these brief considerations, this article aims to (1) present the essential aspects of the Copenhagen Interpretation of the MQ, (2) to criticize this perspective from the point of view of the EPR paradox (Einstein, Podolsky and Rosen) and the “Schrödinger’s cat” and (3) to analyze the mathematical approach and the philosophical consequences of David Bohm’s QM (MQ-B).

Keywords: David Bohm, Quantum Mechanics, Hidden variables.

1. Introdução

A Mecânica Quântica (MQ) é uma das teorias físicas mais bem sucedidas da História da Ciência. De fato, o formalismo matemático desenvolvido em seu bojo tem alta capacidade de predição de distintos fenômenos da natureza; ademais, não há sinalização consistente de que seu arcabouço teórico precise ser substantivamente revisto, ou seja, as relações entre a *realidade matemática* e a *realidade física*, na MQ, têm se mostrado profundamente consistentes [1].

A despeito disso, ainda permanece significativo dissenso sobre *o que a teoria diz sobre o mundo físico* [2], o que se traduz pela existência de diferentes interpretações para a MQ, com destaque para aquela proposta por Niels Bohr e colaboradores – denominada *Interpretação de Copenhague* (IC-MQ) – a qual ressalta o caráter

probabilístico do conhecimento físico sobre a intimidade da matéria [3]. Deve ser ressaltado que, de acordo com esta interpretação, a indeterminação na MQ é *ontológica* e não *epistemológica*, ou seja, é constitutiva da realidade (*ontológica*) e não uma medida da ignorância do investigador acerca de supostas variáveis não explícitas (*epistemológica*); ou seja, o mundo quântico seria indeterminístico em si [4, 5]. Ademais, deve-se considerar a relevância do processo de medida, o qual *converte* um estado inicial de múltiplas possibilidades em uma única que se estabelece, instantaneamente, no momento da mensuração, em razão daquilo que se convencionou denominar *colapso da função de onda*. Baseado em uma concepção indeterminista, Werner Heisenberg, Max Born e Ernst Pascual Jordan, desenvolvem uma abordagem matricial para a MQ, captando valores quantizados, distintos e discretos das grandezas observáveis [4, 6–11].

Os cientistas que se vinculavam à IC-MQ entendiam a MQ como uma teoria completa na descrição do mundo

* Endereço de correspondência: lmecsufv@gmail.com

quântico, uma vez que a indeterminação – conforme comentado – é inerente à realidade. De modo diverso, Albert Einstein – inspirado por uma visão determinista da ciência, defendida por pensadores como Pierre Simon Laplace e Henri Poincaré – propunha que a MQ seria um modelo incompleto, considerando que novas *variáveis ocultas* (não explícitas) deveriam ser tratadas na modelação matemática da teoria [12, 13]. É deste quadro teórico que provêm as famosas frases “*Deus não joga dados*” ou “*Pensas mesmo que a Lua não está lá quando não estás a olhar para ela?*”, cujo tom extremamente crítico à visão indeterminista da realidade quântica, acentuou-se após a publicação dos trabalhos referentes (1) ao paradoxo EPR – ou paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen (elaborado por Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen) – e (2) ao *Gato de Schrödinger* (proposto por Erwin Schrödinger), ambos em 1935 [14, 15].

Nesse cenário de debates – um genuíno *Clube da Luta*, parafraseando a obra de Chuck Palahniuk, adaptada para o cinema por David Fincher –, 17 anos depois dos referidos artigos [14, 15] surge a interpretação de David Bohm para a Mecânica Quântica (MQ-B), baseada no aprofundamento da Teoria da Onda Piloto de Louis de Broglie, de 1927, e fundamentada em *variáveis ocultas*. Com base nessas preliminares considerações, apresentar a proposta da MQ-B de “*descrição causal e objetiva para os fenômenos quânticos*” [16] – partindo (1) da breve exposição sobre a IC-MQ e (2) das críticas a esta dirigidas – é o escopo do presente artigo.

2. A Interpretação de Copenhague

A Mecânica Clássica (MC) – cujo marco é a publicação do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* por Sir Isaac Newton, em 1687 – utiliza a abordagem matemática para a descrição e previsão dos eventos relativos ao mundo físico, caracterizando a realidade a partir de um caráter mecânico-determinista. A hegemônica *visão de mundo* representada pela MC perdurou até os princípios do século 20, com advento da MQ, no bojo da qual se produziu marcante deslocamento de uma explicação causal para o reconhecimento do indeterminismo dos eventos [4, 7, 8].

O indeterminismo atávico da interpretação da Escola de Copenhague se expressa – pode-se dizer – em um acento profundamente probabilístico, não determinístico, da realidade, na lógica das relações de incerteza propostas por Heisenberg. De fato, para o físico alemão o problema da descrição – probabilística – repousa na impossibilidade de se determinar, simultaneamente, posição e *momentum* de uma partícula [17]. Heisenberg considerava a *existência* de uma realidade potencial, alterada pelo observador – aquele que se propõe a mensurar um dado fato –, convertendo-a no real. Tal realidade potencial – dependente do sujeito (ou observador) – é um dos aspectos centrais do Princípio da Incerteza.

O delineamento teórico de Heisenberg pode ser recuperado a partir do trabalho de Born, o qual notou que as grandezas físicas – tais como: velocidade, posição e *momentum* – se relacionavam, matematicamente, como elementos de matrizes; este autor propôs, a partir destas conjecturas, as bases da Mecânica Matricial, juntamente com Jordan, em 1925 [7, 9, 18]. Deve ser destacado que a álgebra definida pelo produto matricial não é comutativa, ou seja, o produto matricial $A \times B$ é diferente do produto $B \times A$. Baseando-se nessa propriedade de não-comutatividade das matrizes, Heisenberg, em agosto de 1925, elabora um formalismo original para a MQ, conhecido como Mecânica Matricial, o qual é apresentado no artigo “*Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanical relations*”, mostrando que as grandezas fisicamente relevantes estão sujeitas a relações de comutação não-triviais, evidenciando o seu caráter não-comutativo. Associou, nestes termos, os estados de energia dos sistemas físicos às linhas espectrais para os fenômenos quânticos – através da álgebra linear aplicada –, sem baseá-las em orbitais, o que era proposto no trabalho de Niels Bohr [7].

Do ponto de vista formal, em representações matriciais – realizadas por operadores hermitianos, os quais descrevem “observáveis” (destaca-se que um operador linear não necessariamente é hermitiano, não representando, portanto, um “observável”) – uma abordagem para os vetores representando os dois estados de helicidade do fóton, em um espaço vetorial de base ortonormal, pode ser apresentada da seguinte forma:

$$|e_1\rangle, |e_2\rangle \quad (1)$$

onde:

$$\langle e_i | e_j \rangle = \delta_{ij} \quad (j = 1, 2) \quad (2)$$

e qualquer vetor de estado, ou função de onda, $|c\rangle$, é escrito como uma combinação linear dos vetores da base acima:

$$|c\rangle = c_1|e_1\rangle + c_2|e_2\rangle \quad (3)$$

para

$$c_1 = \langle e_1 | c \rangle, c_2 = \langle e_2 | c \rangle \quad (4)$$

onde c_1 e c_2 podem ser reunidos como componentes de um vetor-coluna, como segue:

$$|c\rangle = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

e os vetores de base, e_1 e e_2 , admitem a forma canônica:

$$|e_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |e_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Com efeito, em tal formulação da MQ, destacam-se os operadores lineares que aparecem em três categorias

mais proeminentes: (i) *hermitianos*, que representam os observáveis (*momentum*, posição, energia, spin, carga elétrica, como exemplos); (ii) *unitários*, que correspondem a transformações que preservam as probabilidades; e (iii) *antiunitários*, que podem ser escritos como o produto de um operador unitário com a operação de conjugação complexa. Os observáveis – representados por operadores hermitianos – dizem respeito a grandezas que podem ser medidas; como exemplo, os estados de polarização de fótons. Os valores medidos de grandezas observáveis – que correspondem a autovalores dos operadores hermitianos que representam esses observáveis – são valores reais; já os estados, ou funções de onda, são representados por vetores (complexos), contendo o máximo de informações possíveis sobre o sistema estudado. É preciso esclarecer o que se entende por um máximo de informações possíveis sobre os sistemas quânticos. Esse conjunto máximo de informações, que especifica completamente um dado estado ou configuração do sistema em questão, corresponde aos autovalores de um conjunto máximo de operadores hermitianos (observáveis) mutuamente comutantes (logo, podendo ser medidos simultaneamente), ao qual se pode referir como conjunto abeliano máximo (maximal abelian set), do qual fazem parte, também, os operadores que definem as chamadas regras de superseleção. Os trabalhos citados nas referências [19–21] apresentam uma descrição clara e didática sobre o que são e qual a importância dos operadores que definem regras de superseleção.

Matematicamente, como se encontra nos trabalhos originais de Heisenberg [7] e no livro texto de Nussenzveig [22] – tem-se, ao considerar o seguinte par de operadores hermitianos

$$\hat{A} = \hat{A}^+ \quad \text{e} \quad \hat{E} = \hat{E}^+ \tag{7}$$

dois observáveis, um vetor de estado $|v\rangle$ e λ um parâmetro real; com isto, pode-se escrever a desigualdade:

$$\|(\hat{A} + i\lambda\hat{E})|v\rangle\|^2 \geq 0 \tag{8}$$

Esta desigualdade pode ser reescrita como segue abaixo:

$$\langle v|(\hat{A} - i\lambda\hat{E})(\hat{A} + i\lambda\hat{E})|v\rangle \geq 0 \tag{9}$$

Desenvolvendo-a:

$$\langle v|\hat{A}^2|v\rangle + i\lambda \langle v|(\hat{A}\hat{E} - \hat{E}\hat{A})|v\rangle + \lambda^2 \langle v|\hat{E}^2|v\rangle \geq 0 \tag{10}$$

há condução à desigualdade a seguir, quadrática no parâmetro λ :

$$\langle \hat{E}^2 \rangle_v \lambda^2 + i\lambda \langle [\hat{A}, \hat{E}] \rangle_v + \langle \hat{A}^2 \rangle_v \geq 0 \tag{11}$$

onde o comutador dos operadores \hat{A} e \hat{E} , pode ser lido do seguinte modo:

$$[\hat{A}, \hat{E}] \equiv \hat{A}\hat{E} - \hat{E}\hat{A} \tag{12}$$

Como \hat{A} e \hat{E} são operadores hermitianos,

$$(\hat{A}\hat{E} - \hat{E}\hat{A})^+ = \hat{E}\hat{A} - \hat{A}\hat{E} \tag{13}$$

assegura-se que o coeficiente do termo linear em λ , na desigualdade acima, é real. Reconhecendo-se que o coeficiente do termo quadrático em λ é positivo-definido, a condição para que a desigualdade (11) seja válida para qualquer λ real é que o discriminante do polinômio quadrático em λ seja negativo:

$$(i\langle [\hat{A}, \hat{E}] \rangle_v)^2 - 4\langle \hat{A}^2 \rangle_v \langle \hat{E}^2 \rangle_v \leq 0 \tag{14}$$

Logo, segue a desigualdade abaixo para qualquer par de operadores hermitianos em qualquer estado:

$$\langle \hat{A}^2 \rangle_v \langle \hat{E}^2 \rangle_v \geq \frac{1}{4} |\langle [\hat{A}, \hat{E}] \rangle_v|^2 \tag{15}$$

Ao se tomar dois operadores, \hat{X} e \hat{Y} , na relação acima, e definir

$$\hat{A} = \hat{X} - \langle \hat{X} \rangle_v \tag{16}$$

$$\hat{B} = \hat{Y} - \langle \hat{Y} \rangle_v \tag{17}$$

segue-se que:

$$\langle \hat{A}^2 \rangle_v = (\Delta X)_v^2 \tag{18}$$

$$\langle \hat{B}^2 \rangle_v = (\Delta Y)_v^2 \tag{19}$$

o que conduz à Relação de Incerteza:

$$(\Delta X)_v (\Delta Y)_v = \frac{1}{2} |\langle [\hat{X}, \hat{Y}] \rangle| \tag{20}$$

Para casos especiais, nos quais $X = x$ e $Y = p$ ou $X = t$ e $Y = E$, caracteriza-se a célebre *Relação de Incerteza* de Heisenberg, expressa nos seguintes termos:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \tag{21}$$

e

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2} \tag{22}$$

onde:

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$, sendo h a constante de Planck; e Δx , Δp_x , Δt e ΔE designam, respectivamente, as incertezas nas coordenadas de posição, nos componentes do momento, no tempo e na energia. De acordo com a relação de incerteza apresentada na equação (20) e empregando-se as relações de comutação $[x, p_x] = i\hbar$ e $[t, E] = -i\hbar$ – aqui se empregam as representações diferenciais – para os operadores de momentum ($p_x = -i\hbar d_x$) e energia ($E = i\hbar d_t$), obtêm-se as relações de incerteza dadas pelas eqs. (21) e (22).

O produto entre a incerteza do momento (ΔP_x) e a incerteza da posição (Δx) não pode ser menor que $\frac{\hbar}{2}$, sendo $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, o que limita a possibilidade de conhecer, ao mesmo tempo, o momento e a posição. Deste modo, ao se determinar (P_x) com precisão absoluta $\Rightarrow (\Delta P_x = 0)$, nada é possível saber a respeito da posição (x) \Rightarrow

($\Delta x = \infty$); de outro modo, ao se identificar (x) com precisão absoluta $\Rightarrow (\Delta x = 0)$, nada se pode definir a respeito do momento (P_x) $\Rightarrow (\Delta P_x = \infty)$. Torna-se, pois, impossível definir, de modo preciso, a trajetória de uma partícula no mundo quântico, diferentemente do que ocorre no âmbito da MC [7].

A interpretação matricial, de caráter matemático, proposta por Heisenberg – expressa em termos de uma álgebra não-comutativa, para grandezas observáveis – foi a primeira forma revolucionária de substituir por uma matriz a coordenada de momento e posição do elétron:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar \quad (23)$$

ressaltando-se que comutador dos operadores \hat{x} e \hat{p} é proporcional ao operador identidade \hat{I} .

É importante notar que as abordagens ondulatórias de Schrödinger e matricial de Heisenberg representam dois modelos que, em última análise, retratam os mesmos sistemas quânticos, mas, empregando distintos formalismos matemáticos [23–26].

O tratamento dado por Heisenberg [7] para a sua formulação da Mecânica Matricial, inspirou Paul Dirac, o qual, em novembro de 1925, publica um salutar tratado algébrico – conhecido como “*The fundamental equations of quantum mechanics*” – no qual apresenta uma abordagem mais elegante do que aquela proposta por Heisenberg, autor que buscava descrever as linhas espectrais. Dirac ansiava pela beleza matemática, introduzindo a ideia dos números quânticos, de modo que, em 1927, publica um segundo tratado algébrico conhecido como “*The physical interpretation of the quantum dynamics*”, estendendo a MC para incluir a descrição de fenômenos microscópicos, sobre duas novas teorias quânticas, a matricial e a algébrica [27–31].

Coube também a Dirac introduzir a notação *Bra-Ket* – formulada no trabalho “*A new notation for quantum mechanics*” [32] –, na qual as funções de ondas são representadas por *kets*:

$$|\psi\rangle = \sum_k c_k |k\rangle \quad (24)$$

e o espaço vetorial dual dos *kets* é explicitado como espaço dos *bras*:

$$\langle\psi| = |\psi\rangle^+ = \sum_k c_k^* \langle k| \quad (25)$$

Em três estados de um sistema conhecidos, sendo esses linearmente independentes e definidos como vetores, tem-se:

$$|a\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$|b\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$|c\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

cuja base de um espaço vetorial, expandindo cada função de onda externada por um vetor, produzirá um estado *ket*:

$$|\Psi\rangle = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (29)$$

ou estado *bra*:

$$\langle\Psi| = (c_1^* \quad c_2^* \quad c_3^*) \quad (30)$$

O $|\Psi\rangle$ é uma combinação linear dos estados, a normalização do estado $|\Psi\rangle$ dado pela equação (31), com a perspectiva de calcular a probabilidade de estar em um estado. A normalização do estado $|\Psi\rangle$ é dada por:

$$\begin{aligned} \|\Psi\|^2 = \langle\Psi|\Psi\rangle &= (c_1^* \quad c_2^* \quad c_3^*) \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \\ &= |c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2 \end{aligned} \quad (31)$$

Cada um dos coeficientes c_i ($i = 1, 2$ e 3) representa a amplitude de probabilidade para se encontrar o sistema nos estados $|a\rangle$, $|b\rangle$ e $|c\rangle$, respectivamente.

Nos trabalhos de Schrödinger e de Broglie, há considerações realistas e deterministas. Porém, é de natureza estatística o significado físico da função de onda $\psi(r, t_o)$ da equação de Schrödinger [23, 33], cuja interpretação probabilística coube a Born [34]. Deve-se comentar, igualmente, que de acordo com o Princípio da Incerteza, Heisenberg reconhecia a existência de uma limitação na informação das partículas. Desta feita, sua representação matricial era considerada soberana para a compreensão da MQ sobre a natureza da partícula-onda. De outro modo, na visão de Niels Bohr, haveria uma “complementaridade” sobre a aparência onda-partícula, a qual também influenciava na medição, uma não é sem a outra. A onda necessita das partículas e estas precisam do primeiro elemento físico, o que produz uma composição tanto de natureza ondulatória quanto corpuscular [22, 33, 35–37].

3. Duas Críticas à Interpretação de Copenhague: O Paradoxo EPR e o Gato de Schrodinger

A visão determinista de mundo representou um grande manancial para a emergência de críticas à IC-MQ. Nesse sentido, vale ressaltar a importância de dois pensadores do século XIX, Pierre Simon Laplace – para quem “(…)”

uma inteligência que pudesse conhecer todas as forças pelas quais a natureza é animada e o estado em um instante de todos os objetos (...) nada lhe seria incerto e o futuro, assim como o passado, estaria presente ante os seus olhos” [38, p. 326] – e Jules Henri Poincaré, cuja visão concebia que a – “ciência é determinista, ela o é a priori; ela postula o determinismo, porque ela não poderia existir sem ele. Ela o é também a posteriori; se ela começou por postulá-lo como uma condição indispensável de sua existência, ela o demonstra a seguir precisamente por existir, e cada uma dessas conquistas é uma vitória do determinismo” [39] (cap. 8) – os quais nutriam concepções profundamente deterministas em respeito à ciência. Dois trabalhos da primeira metade do século 20 – os quais serão comentados a seguir – expuseram, sem embargo, importantes objeções teóricas à IC-MQ, de uma perspectiva articulada ao determinismo.

3.1. Paradoxo EPR

Publicado em 1935 – por Einstein, Podolsky e Rosen – o famoso paradoxo EPR, um experimento imaginário sobre duas partículas separadas espacialmente que possuem posições e momentos correlacionados, dando impulso às investigações sobre a não localidade na MQ, expôs lacunas na Interpretação de Copenhague, formulada por Bohr e Heisenberg, em 1927 [40, 41], e também colocou o emaranhamento quântico em questão [14].

A argumentação do paradoxo EPR se sustenta nas premissas referentes ao realismo local, segundo as quais se pode prever o valor de uma quantidade física sem produzir perturbação no sistema. A questão a ser considerada diz respeito à não-compatibilidade entre a suposição de localidade e a ideia de ação à distância, de modo que as medições em um local A não devem instantaneamente perturbar o sistema em uma posição B espacialmente separada [14, 42, 43].

A proposta dos três autores – para os quais “*todo elemento da realidade física deve ter uma contrapartida na teoria física*” [14, p. 777] – pode ser assim descrita: considerem dois sistemas I e II – por exemplo, duas partículas quânticas – cujos estados, em um momento inicial ($t = 0$) são conhecidos. Durante um tempo finito, $t = t_1$, há interação entre I e II. A equação de Schrödinger permite o cálculo do estado Ψ_{I+II} do sistema I+II, combinado, em qualquer tempo t_2 , desde que $t_2 > t_1$, de acordo com:

$$\Psi_{I+II}(x_I, x_{II}) = \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(x_{II})u_n(x_I) \quad (32)$$

onde x_I e x_{II} são, respectivamente, as variáveis empregadas para a descrição dos sistemas I e II; $u_n(x_I)$ são autofunções de um dado operador A, relativo ao sistema I com autovalores denotados a_n ; o termo $\Psi_n(x_{II})$ diz respeito aos coeficientes da expansão de Ψ_{I+II} na base ortogonal produzida a partir de $u_n(x_I)$.

Quantificando no sistema 1 o operador A, obter-se-á um valor ak , em que o estado do sistema combinado será reduzido para $\Psi_k(x_{II})u_k(x_I)$ na equação (1). Essa redução do pacote de onda impõe que os sistemas, após as medidas, estejam localizados nos estados $\Psi_k(x_{II})$ e $u_k(x_I)$. Ademais, o conjunto de autofunções $v_s(x_I)$ de um operador B com autovalores bs , usados como base ortogonal, implica em um estado do sistema expandido da seguinte maneira:

$$\Psi_{I+II}(x_I, x_{II}) = \sum_{n=1}^{\infty} \emptyset_s(x_{II})v_s(x_I) \quad (33)$$

onde $\emptyset_s(x_{II})$ são na base ortogonal $v_s(x_I)$. os coeficientes da expansão de Ψ_{I+II} .

No sistema 1, se o operador B for medido será obtido br como resultado, o estado do sistema combinado será reduzido para $\emptyset_r(x_{II})v_r(x_I)$, estando o sistema 1 no estado $v_r(x_I)$ e o sistema 2 estando no estado $\emptyset_r(x_{II})$, observa-se que duas medidas distintas realizadas no sistema 1 implica em dois estados distintos para o sistema 2. Em última análise, a IC-MQ, amparava-se na ideia da existência de um sistema quântico em um conjunto de todos os sistemas possíveis (velocidades, direções de spin, posição, entre outros) e através de uma observação seria acessível a informação de um desses estados mistos [14]. Partindo da premissa de que o realismo local deva ser válido, o paradoxo EPR buscou uma melhor formulação para a MQ, sem questionar a sua validade, ao reconhecer que se um sistema de suposições chamado de realismo local for mantido, tem-se uma formulação incompleta para a MQ [42].

O pressuposto – quicá laplaciano – de Einstein, Podolsky e Rosen orientava para uma compreensão determinista da natureza enfatizando questões referentes ao realismo e à localidade. De fato, a proposta formulada pelos três físicos realçou as observações da não localidade da MQ, ao considerar o caso de duas partículas quânticas espacialmente separadas que têm momentos e posições anticorrelacionadas [42]. Com efeito, para tais autores, havia um equívoco em relação às novas interpretações da não-localidade, aos indeterminismos e às incertezas nas medidas ou observações, de modo que a conclusão – óbvia, talvez – é de que a MQ estava incompleta [14].

Fisicamente, pode-se exemplificar tal situação em um decaimento do méson π^0 neutro em um pósitron e em um elétron:

$$\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ \quad (34)$$

Estando em repouso o pión, o pósitron e o elétron estarão em direções opostas, um em relação ao outro. Supondo o pión com spin nulo, e as partículas acima, em um estado correlacionado, o momento angular total do estado será zero. Se o pósitron possuir spin para baixo o elétron terá o spin para cima e não se saberá a combinação que ocorrerá em um decaimento, mas estarão disponíveis as informações correlacionadas nas

medidas. Como exemplo, considere-se que o elétron se desloque por 15 anos-luz; se a mensuração do seu spin revela que este está “para cima”, necessariamente o pósitron terá spin “para baixo” mesmo separados 15 anos-luz [37].

Tal ação à distância foi assombrosa para Einstein, Podolsky e Rosen, pois o elétron e o pósitron deveriam ter os spins bem definidos [37]. Uma das consequências desse quadro teórico diz respeito ao fato das informações quânticas parecerem mais rápidas do que a velocidade da luz, o que contradiria a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein [14] e aboliria o sentido físico da ideia do colapso da função de onda para possíveis eventos localizados [37].

Posteriormente, com o emaranhamento (ou entrelaçamento) quântico – fenômeno assim nomeado por Schrödinger, ou “ação fantasmagórica”, tal qual a alcinha proposta por Einstein – propôs-se um processo de correlações quânticas entre distintos estados, nos quais grupos de partículas ou ondas, interagem; neste contexto, mesmo a distâncias astronômicas, as descrições dos referidos grupos tornam-se dependentes umas das outras [14, 44, 45]. A conclusão – bombástica – dos três autores, Einstein, Podolsky e Rosen, não poderia ter sido mais contundente: “*Embora tenhamos mostrado que a função de onda não fornece uma descrição completa da realidade física, deixamos em aberto a questão de se essa descrição existe ou não. Acreditamos, no entanto, que tal teoria seja possível*” [14, p. 780].

3.2. O Gato de Schrödinger

A participação do observador na MQ, em termos do processo de mensuração, permanece como temática amplamente sujeita à discussão, mormente ao se considerar os limites de uma visão subjetivista. Desta feita, em termos da interpretação ondulatória, a noção de colapso da função de onda faz mais sentido. Tal ideia foi amplamente criticada por Erwin Schrödinger, em 1935, autor que articula consistentes objeções à IC-MQ – com ênfase na transferência da superposição coerente ao nível macroscópico –, sugerindo a possibilidade da observação de interferências, a partir da proposição do seguinte experimento mental [46, 47]:

“Um gato é preso dentro de uma câmara de aço, juntamente com um ‘dispositivo diabólico’ no interior do contador Geiger, em que há uma pequena quantidade de material radioativo, tão pequena que talvez, no decorrer de uma hora, um dos seus átomos decaia, mas também, com igual probabilidade, talvez nenhum decaia; se isso acontecer, o contador irá liberar uma descarga e através de um relé soltará um martelo que irá quebrar um frasco contendo ácido cianídrico. Durante uma hora, deixamos todo o sistema isolado então diremos que o gato ainda

vive, se nenhum átomo decaiu durante esse tempo. A função de onda do sistema como um todo iria expressar isto contendo em si mesma o gato vivo e o gato morto simultaneamente ou dispostos em partes iguais. É típico destes casos que uma indeterminação originalmente confinada ao domínio atômico venha a transformar-se numa indeterminação macroscópica, a qual pode então ser resolvida pela observação direta. Isso previne-nos de tão ingenuamente aceitarmos como válido um ‘modelo impreciso’ para representar a realidade. Em si mesma esta pode não incorporar nada de obscuro ou contraditório” [15, p. 812].

Para tanto, pode ser indagado, como fez Schrödinger: “*Em qual estado o gato estaria após um tempo para fazer o dispositivo funcionar?*”. De acordo com a visão subjetivista, como não existe ali um observador, não ocorre o colapso da função de onda, o que resulta em uma sobreposição de gato-vivo e gato-morto, com a possibilidade de representar-se ambos os estados quânticos. Destaca-se, nesse sentido, que somente através de uma observação, poderia se definir o estado do sistema. Tal proposição parece absurda, quando confrontada com as ideias clássicas, uma vez que de acordo com estas últimas o estado não seria modificado ou afetado pelo ato de observar. Seria possível uma superposição macroscópica do gato sobre tais estados quânticos? Sendo ele um sistema quente, não seria possível existir a superposição devido às flutuações; mas sendo frio, ele estaria próximo a uma temperatura do *Zero Kelvin*, o que culmina na impossibilidade de estar vivo.

Em uma combinação linear de dois estados físicos possíveis, tem-se a probabilidade de que o *Gato de Schrödinger* – como se tornou conhecido o experimento – esteja vivo e esteja morto:

$$|\Psi_{\text{gato}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{vivo}\rangle + |\text{morto}\rangle) \quad (35)$$

Observam-se, nas figuras 1 e 2 abaixo, as probabilidades para o estado *vivo* e para o estado *morto* ou ambas situações coexistindo. Com efeito, em termos das superposições quânticas, uma subpartícula ou um sistema quântico, ao mesmo tempo antes de ser medido, existe em todos os estados quânticos possíveis [15].

Deste modo, Schrödinger – similarmente ao proposto no Paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen – expõe um exemplo para a possibilidade de vários estados quânticos superpostos, ocasionando situações absurdas no nível macroscópico, tendo em vista a influência do observador e do observado, em um colapso da função de onda [15, 35–37].

Analisando, fisicamente, em termos das superposições quânticas, pode-se dizer que um sistema quântico ou partícula, está ao mesmo tempo em todos os estados quânticos possíveis, antes de tal sistema seja

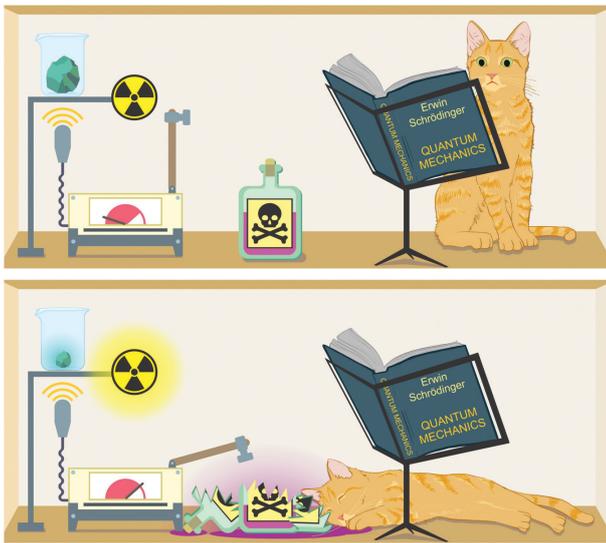


Figura 1: Situação estado vivo e para o estado morto [48]. Ilustração elaborada por Ademir Nunes Ribeiro Júnior (UFRJ).



Figura 2: Ambos estados coexistindo [48]. Ilustração elaborada por Ademir Nunes Ribeiro Júnior (UFRJ).

observado [15]. Assim, através da combinação linear de dois ou mais estados quânticos possíveis, ou mesmo ambos coexistindo, até que uma medição ocorra a qual interferirá na observação, existe a probabilidade do gato estar vivo ou morto [15, 37]. Por fim, para o autor, é impossível a existência de ambos os estados físicos e o observador influenciando as informações do sistema quântico [15, 37, 49].

3.3. Síntese das críticas

Os experimentos mentais sucintamente apresentados – o Paradoxo EPR e o Gato de Schrödinger – constituíram críticas à Interpretação de Copenhague, tendo em vista a possível *incompletude* da MQ, expondo situações “absurdas” em nível macroscópico sobre a possibilidade de estados superpostos em um nível quântico [14, 22, 35–37]. Assim, existe uma salutar estranheza na MQ, quando esta é analisada em termos clássicos.

O enfrentamento desses enigmáticos resultados tornou-se um dos desafios intelectuais de Bohm, o qual, em 1952 – mesmo ano em que chegou ao Brasil – publicou dois artigos seminais, elaborados ainda nos

Estados Unidos, com inovadoras perspectivas sobre a MQ, concepção cuja (tentativa) de compreensão, em certo sentido, dedicou sua vida [50]. Nestes manuscritos, como se verá adiante, propõe-se uma versão determinista, inscrita na não-localidade, para os sistemas físicos, abrindo as possibilidades para uma nova interpretação no âmbito da MQ, a qual será apresentada a seguir [16, 49, 51].

4. A Interpretação de David Bohm

David Bohm, físico nascido nos Estados Unidos, em 1917, obteve seu doutorado na Universidade da Califórnia, em Berkeley, no ano de 1943, sob a orientação de Robert Oppenheimer, com o qual estudou a Teoria dos Quanta [52]. Na sequência, ministrou um curso sobre a mesma temática, em Princeton, cujas ideias foram organizadas no livro *Quantum Theory* [53]. Um dos pontos importantes, nessa originária elaboração intelectual do autor, foi a busca pelo entendimento da IC-MQ (ver Quadro 1, no qual Bohm sumariza as suposições básicas do indeterminismo quântico), especialmente as concepções de Bohr, movimento no qual o problema da causalidade torna-se uma questão especial: “A interpretação usual da Teoria dos Quanta nega a causalidade e, tendo proposto outra interpretação que parece reafirmá-la, achava que talvez o quadro probabilístico da Mecânica Quântica pudesse ser entendido de uma forma similar à Mecânica Estatística” [52, p. 189].

A insatisfação de Bohm com esse primeiro tratamento dispensado às questões da MQ, levou-o a reformular suas ideias nos anos subsequentes, para o que contribuíram as discussões – científicas e filosóficas – empreendidas pelo físico durante sua estada no Brasil (outubro de 1951 a janeiro de 1955), uma consequência da perseguição macarthista sofrida nos EUA [51]. De fato, Bohm relata que seu interesse por filosofia o levou a uma série de debates, em especial às “(...) discussões com Mário Schenberg, sobre uma abordagem dialética da causalidade” (p. 189) [52], destacando-se o desenvolvimento de ideias sobre probabilidade em cooperação com Walter Schützer, as quais culminaram na publicação de importante artigo [55]. No cerne de suas dúvidas estava “uma discussão sobre o real, um real independente do observador, ao passo que, do modo usual (entenda-se, aqui, a IC-MQ), o real ficava dependendo do observador” (p. 191) [52]. Com efeito, o cientista considerou que estava completamente equivocada a visão de que necessariamente um observador precisaria estar “presente” para que exista uma realidade: “(...) no fim das contas, o real depende do físico que o observa, quer dizer, se você tiver uma função de onda que entre em colapso num e não em outro resultado, então o físico também tem que entrar em colapso” (p. 191) [52].

De 1951 a 1957, o físico (agora naturalizado brasileiro) trabalhou em uma nova formulação da MQ, a qual foi primeiramente apresentada em dois artigos de 1952 já

Quadro 1: Breve síntese da Mecânica Quântica de acordo com David Bohm (MQ-B).

1. As leis fundamentais da teoria quântica devem ser expressas com o auxílio de uma função de onda (em geral, multidimensional), que satisfaz uma equação linear (de modo que as soluções possam ser superpostas linearmente).
2. Todos os resultados físicos devem ser calculados com o auxílio de certos “observáveis”, representados por operadores hermitianos, que operam linearmente sobre a função de onda.
3. Qualquer observável em particular é definido (claramente definido) somente quando a função de onda é uma eigenfunção* do operador correspondente.
4. Quando a função de onda não é uma eigenfunção desse operador, então o resultado de uma medição do observável correspondente não pode ser determinado de antemão. Os resultados de uma série de medições efetuadas sobre um ensemble ** de sistemas representado pela mesma função de onda flutuará aleatoriamente (sob ausência de lei) de um caso para o seguinte, cobrindo as várias possibilidades.
5. Se a função de onda é dada por $\psi = \sum_n C_n \psi_n \quad (36)$ onde ψ_n é a eigenfunção do operador em questão correspondente ao enésimo eigenvalor***, a probabilidade de se obter o enésimo eigenvalor num grande ensemble de medições será dada por $P_n = C_n ^2$.
6. Devido à não-comutação de muitos operadores (tais como P e x) que correspondem a variáveis que devem ser definidas conjuntamente na mecânica clássica, segue-se que não podem existir funções de onda que sejam eigenfunções simultâneas de todos os operadores significativos para um dado problema físico. Isto significa que nem todos os observáveis fisicamente significativos podem ser determinados conjuntamente e, o que é mais importante, aqueles que não são determinados flutuarão aleatoriamente (sob ausência de lei) numa série de medidas tomadas num ensemble representado pela mesma função de onda.

*Também conhecida como autofunção. (N. do T.).

**Conjunto estatístico de sistemas identicamente preparados e submetidos às mesmas condições. (N. do T.).

***Também conhecido como autovalor. (N. do T.).

Fonte: *Os itens 1–6 são citações, *ipsis litteris*, de BOHM (p. 99–100; grifo do original) [54].

comentados [16, 56]. Estes textos trouxeram a elaboração de um modelo capaz de reproduzir os resultados físicos alcançados pela IC-MQ, com a utilização de variáveis ocultas, ou seja, a partir de pressupostos teóricos bastante díspares [54]. Propõe-se um caráter determinístico ao formalismo quântico, aplicado à realidade de toda a matéria, com a delimitação de uma nova relação da natureza ondulatória das partículas, a qual abrange a Teoria da Onda Piloto – proposta originalmente por De Broglie [6] – para problemas de muitos corpos, a partir da introdução de um campo e de um potencial multidimensional para um só objeto [51, 57]. Deste modo, foi possível obter “uma descrição contínua, detalhada e causal de todos os processos” [16, p. 166]. As concepções trabalhadas nos textos de 1952 são consolidadas na obra *Causality and Chance in Modern Physics* [58], na qual é apresentada a abrangência dos conceitos de acaso e causalidade nas leis da natureza e articulada relevante crítica à noção do universo como um gigantesco mecanismo, a partir dos avanços produzidos pela Teoria da Relatividade Geral (TRG) e pela MQ.

Na MQ-B, atribui-se uma ontologia aos sistemas físicos. No caso particular da MQ não-relativista, tais sistemas são compostos por partículas puntiformes que se movem descrevendo trajetórias quânticas no espaço, como uma lei de evolução atribuída às partículas, matematicamente. Para isto, Bohm estabelece uma força

oriunda do potencial total para o movimento das partículas, em que:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{m} \vec{\nabla} S \quad (37)$$

Onde para R e S , funções reais, m a massa da partícula, com S parametrizando a função de onda, ψ , de acordo com a decomposição polar:

$$\psi = R \left[\frac{i}{\hbar} S \right] \quad (38)$$

sendo R real, e m é a massa inercial da partícula. Esta função de onda, satisfaz à equação de Schrödinger:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \quad (39)$$

Em que V é o potencial clássico. A parametrização polar da equação (38), permite a obtenção, com manipulações simples para R e S , de:

$$\frac{\partial}{\partial t} S + \frac{(\vec{\nabla} S)^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{(\vec{\nabla} R)^2}{R} + V = 0 \quad (40)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} R^2 + \frac{1}{m} \vec{\nabla} (R^2 \vec{\nabla} S) = 0 \quad (41)$$

A reelaboração da função – proposta, por Bohm, como solução da equação de onda de Schrödinger – permite a

delimitação de analogias com o formalismo hamiltoniano da mecânica clássica [51]. De fato, a abordagem matemática enunciada em (39) foi descrita como uma equação clássica de Hamilton-Jacobi:

$$\frac{\partial}{\partial t} S + \frac{(\vec{\nabla} S)^2}{2m} + Q + V = 0 \quad (42)$$

onde

$$Q \equiv -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{(\vec{\nabla} R)^2}{R} \quad (43)$$

Deve-se comentar que as equações acima são derivadas da equação de Schrödinger que é não-relativística. Esta observação ilustra o fato de que a proposição de Bohm não é compatível com a Teoria da Relatividade Especial. Mas, nada impede que se formule uma abordagem relativística.

A energia mecânica total do sistema, representada pelo hamiltoniano, de acordo com a perspectiva do físico estadunidense, é apresentada como um *terceiro termo* – para além das energias potencial e cinética –, o qual, todavia, não possui um correlato na MC. A estratégia adotada por Bohm foi a caracterização deste termo – a equação (42) – como um *potencial quântico* (distinguindo-o, por conseguinte, de um potencial clássico), o qual “*é uma função, não dos estados das partículas, mas determinada num espaço multidimensional a partir das propriedades do todo*” [52, p. 196]. Tal delineamento é típico da MQ-B. Ademais, a equação (41), relaciona velocidade e o momento da partícula em termos da fase, S , como:

$$\vec{v} = \frac{1}{m} \vec{\nabla} S(t; \vec{v}) \quad (44)$$

e

$$\vec{p}(t; \vec{x}) = \vec{\nabla} S(t; \vec{x}) \quad (45)$$

Assim, o momento, $\vec{p}(t; \vec{x})$, é determinado pelo campo (fase) S , mesmo em um nível quântico:

$$\Psi(t; \vec{x}) = R(t; \vec{x}) e^{\frac{i}{\hbar} S(t; \vec{x})} \quad (46)$$

Deve-se comentar que na MQ-B, “*as variáveis momento e posição de uma partícula, bem-definidas, são denominadas suas variáveis suplementares, ou escondidas*” [51, p. 59], as quais apresentam existência simultânea, sob a forma do potencial quântico – equação (42). Tais variáveis, desta perspectiva, não aparecem no processo, de modo explícito, o que torna o modelo bohmiano “*determinístico e não-local*” [51, p. 60]. A interpretação proposta por Bohm não prevê o colapso da função de onda – como consequência do processo de medição – e concebe a existência de partículas que descrevem trajetórias no espaço, as quais são descritas a partir da função de onda concorde com a equação de Schrödinger [58–60]. Deste modo, em decorrência das condições iniciais, a delimitação das trajetórias torna-se possível – a partir

de uma equação diferencial de primeira ordem –, o que representa um autêntico determinismo na esfera da MQ-B, ou seja, neste “*modelo a mecânica newtoniana clássica não perde a validade no domínio quântico, e Bohm a expressa escrevendo a segunda lei de Newton para uma partícula quântica*” [51, p. 59].

A visão da realidade quântica, formulada por Bohm, exprime, em última análise, um quadro conceitual típico do realismo matizado pela concepção de causalidade. Ademais, tendo em vista “*a equação de movimento dada pelas leis de Newton e mais as condições iniciais tem-se então recuperado o conceito de trajetória no espaço-tempo que perdeu seu sentido exato na interpretação usual da teoria quântica*” [51, p. 59], qual seja, a IC-MQ. Com efeito, dada a proposta do físico de “*pensar o mundo como um só, como uma única realidade*” [52, p. 191], é possível notar que o determinismo formulado no bojo da MQ-B se aplica à realidade de toda a matéria, abrangendo a natureza ondulatória e as partículas microscópicas [17, 61].

O intento de compreender o mundo físico “*como uma única realidade*” [52, p. 191] levou a MQ-B a fronteiras particularmente salutares – em uma genuína interseção entre física e filosofia, com eventuais implicações para a área de ensino de ciências –, mormente ao se considerar a formulação de uma *totalidade indivisa* – “*implicada não apenas no conteúdo da física (notavelmente na teoria da relatividade e na teoria quântica), mas também na maneira de trabalhar em física*” [54, p. 193], uma vez que esta se refere à “*maneira pela qual modos de entendimento teórico e de observação e instrumentação estão relacionados entre si*” [54, p. 193]. A *totalidade indivisa* bohmiana diz respeito à certa ordem, à qual a lei física se refere, marcadamente dinâmica e cuja melhor ‘imagem’ é o holograma. Desta caracterização emergem três conceitos essenciais formulados pelo próprio David Bohm, a partir dos anos 1960: *ordem explicada*, *ordem implicada* e *holomovimento* [54].

- (1) A *ordem explicada* (ou *explícita*), desdobrada, aparente (ou seja, aquilo que se apresenta como manifesto) e que abrange o espaço-tempo quadridimensional e os distintos entes e eventos corriqueiros, separados entre si, passíveis de análise pelas trajetórias, pelos momentos e pelas velocidades das partículas [54]. O domínio fenomênico da realidade – p. ex., as leis físicas, as “*coisas reais*” do cotidiano, os entes aparentemente separados e autônomos [54, 62] – refere-se, para Bohm, ao âmbito próprio da *ordem explicada*.
- (2) A *ordem implicada* (ou *implícita*), mais profunda, dobrada – pois, *implicar* é “*dobrar para dentro*” [54, p. 199] – e não aparente, contém a *ordem explicada* e é capaz de oferecer um modelo “*muito mais coerente das propriedades quânticas da matéria do que a ordem mecanicista tradicional*” [54, p. 244]; tal ordem é a instância na qual os distintos eventos separados, concernentes

à realidade manifesta, explícita, se interligam nos termos de uma totalidade subjacente [63]. Trata-se, pois, de uma instância não diretamente apreensível, a qual pode ser descrita pela função de onda, Ψ , que exprime o caráter representativo da geometria do espaço-tempo, de modo que tais grandezas, espaço e tempo, assumem o papel de meras coordenadas [60]. O processo de desdobramento do espaço-tempo, a partir da ordem implícita, depende de uma compreensão algébrica da realidade, para a qual os conceitos de *spinors*¹ (conforme trabalhado por Wolfgang Pauli e Paul Dirac) e de *twistors*² (propostos por Roger Penrose) são bastante úteis [52]. Com base nestes apontamentos, pode-se tomar a *ordem implícita* como “o fundamento ontológico da realidade” [64, p. 18].

- (3) O *holomovimento*, de ὅλος (*holos* = todo, em grego), uma *totalidade* não limitada “*ininterrupta e indivisa*” [54, p. 202], a qual tem a prerrogativa de “transportar” uma *ordem implicada*, o que permite uma compreensão da realidade que considera a inclusão de todas as coisas em uma “*ordem de totalidade indivisa*” [54, p. 208]. Pode-se conjecturar que tudo o que existe provém e retorna ao *holomovimento*. A realidade, desde este ponto de vista, passa a ser vista como um *tecido* constituído por profundas interconexões.

A partir dessas ponderações, depreende-se que a formulação originária, determinística, da MQ-B – na qual o *princípio da incerteza* de Heisenberg perde o caráter fundamental na interpretação probabilística usual – é essencialmente *realista e não-local* [6, 36, 51, 65, 66]. Para muito além de uma visão mecanicista e reducionista – em relação à qual o físico era crítico [67]: deve-se “*abandonar a ordem mecanicista*” [54, p. 233] – a evolução do pensamento de Bohm pode ser inscrita em uma perspectiva *monista* – cuja potência é aproximável à filosofia de Baruch Spinoza [68] –, ou *holista* – dada a preeminência da ideia de totalidade em seu pensamento [64] – ou, quiçá, *monista de aspecto holista/pampsiquista*, como proposto por Atmanspacher [69]. De fato, a preocupação de *unir instâncias até então separadas* alcança cada vez maior relevância no pensamento de Bohm, tanto no âmbito *epistemológico* (teorias para a descrição da realidade, como MQ e TRG), quanto *ontológico* (p. ex., nas suas considerações acerca do corpo e da mente).

A perspectiva de unificar a MQ e a TRG é compreendida como uma tarefa não trivial, na medida em que os conceitos fundamentais de ambas “*se contradizem*

diretamente” [54, p. 233], o que impõe o desenvolvimento de uma “*teoria qualitativamente nova, a partir da qual tanto a relatividade quanto a teoria quântica possam ser derivadas como abstrações*” [54, p. 233]. Este empreendimento passa, necessariamente, pelo reconhecimento daquilo que tais modelos têm em comum, a *totalidade indivisa*, para a qual “*por caminhos diferentes (...) ambas estão fundamentalmente apontando*” [54, p. 233]. Tal esforço poderia ser entendido no quadro mais amplo de uma *cosmologia* de David Bohm, esfera na qual a proposição epistêmica de uma unificação das principais teorias vigentes para a descrição do mundo físico, a TRG e a MQ, seria finalmente efetivada.

É provável, no entanto, que ainda mais radical – ou vanguardista – seja a posição do físico de não distinguir *corpo e mente* (há uma crítica, por exemplo, ao termo “psicossomática” em *A totalidade e a ordem implicada*). Bohm pontua, de outro modo, que a ordem *explicada*, manifesta, da consciência e da matéria em geral, não se distingue, referindo-se, em última análise, a aspectos da ordem global única, *implicada*. Assim, é possível dizer que “*a mente dobra em si a matéria em geral e, portanto, o corpo em particular [e] o corpo dobra em si não apenas a mente mas também, em certo sentido, todo o universo material*” [54, p. 274], o que exprime, em plenitude, o reconhecimento de que a realidade não pode ser redutível à mente e/ou ao corpo mas, outrossim, a uma “*dimensão mais elevada, que é a base comum de ambos e cuja natureza está além de ambos*” [54, p. 274]. Há, com efeito, uma unificação destas dimensões, corpo e mente, em uma tessitura mais profunda da realidade, a *ordem implicada*, genuína síntese daquilo que se pode denominar, provisoriamente, como *ontologia* de David Bohm.

5. Considerações Finais

A interpretação de Bohm para a MQ e algumas das consequências epistemológicas e ontológicas das ideias do autor foram abordadas no presente artigo. A estratégia adotada incluiu a apresentação (1) de aspectos da hegemônica *Interpretação de Copenhague* da MQ, expondo seus conceitos e formalismo matemático, (2) das críticas organizadas em termos de dois experimentos mentais, o *Gato de Schrödinger* e o Paradoxo EPR, e (3) dos elementos matemáticos e conceituais da MQ-B, a partir dos quais foram brevemente contextualizadas suas considerações epistemológicas e ontológicas em termos dos conceitos de *ordem explicada*, *ordem implicada* e *holomovimento*.

Os contrastes entre a IC-MQ e a MQ-B foram esboçados – ao menos, este foi o intento – de modo a permitir a caracterização dos dois modelos explicativos capazes de alcançar sucesso empírico – e de obter, via de regra, os mesmos resultados físicos – mesmo com pressupostos tão distintos: “*Para Bohr a mecânica quântica é indeterminada; para Bohm, determinada.*

¹ Spinors são os elementos complexos do espaço (afim) que porta a representação fundamental da Álgebra de Clifford associada a um dado espaço-tempo. Se a dimensão deste é D , os espinores são objetos de dimensão $2^{[D/2]}$, sendo $[D/2]$ a parte inteira de $D/2$.

² Twistors são os objetos que portam a representação fundamental do grupo de spin $SU(2,2)$ associado ao grupo conforme, $SO(2,4)$, do Espaço de Minkowski da Teoria da Relatividade Especial.

Para Bohr, o princípio da incerteza de Heisenberg é um princípio ontológico de indeterminação; para Bohm, é um princípio epistemológico de ignorância” [70, p. 71].

David Bohm construiu uma sólida biografia intelectual, matizada pela tentativa de apreender a realidade quântica, enfrentando o desafio heraclítico diante de uma “natureza que ama se ocultar” [71], como vem sendo discutido em recentes referências dirigidas à análise da produção do autor [72–74]. Sua interpretação, inaugurada nos clássicos artigos de 1952, e desenvolvida nos trabalhos posteriores, não recebeu o devido crédito à época e nos anos subsequentes, o que o torna, na linguagem de Olival Freire Jr., um *dissidente quântico* [75]. Todavia, nos últimos anos, derradeiras décadas do século 20 e princípios do século 21, seu pensamento vem adquirindo marcante ressonância – especialmente pelo ressurgimento do interesse pelos fundamentos da MQ [76], cujo marco pode ser situado nos estudos que culminaram na desigualdade de Bell –, não apenas na física mais em outras esferas da cultura. Desta feita, destacam-se as aplicações da MQ-B para a Física de Partículas, a Física da Matéria Condensada – abrangendo fenômenos como a superfluidez e a supercondutividade – e, especialmente, para a Teoria Quântica de Campos – e suas aplicações à Cosmologia – como condição para uma Cosmologia Quântica [66, 77, 78] e das dificuldades da MQ-B sobre a generalização relativística [79, 80]. Uma das possibilidades atuais – e instigantes – diz respeito à aplicação da MQ-B no âmbito da Teoria da Informação Quântica [81], tema que vem recebendo maior atenção no espaço de interseção entre MQ e computação [82–84].

A contribuição do pensamento de Bohm ao problema da consciência – provavelmente, a última grande fronteira – tem sido revisitada. De fato, vários autores têm dedicado significativos esforços para a elaboração de uma Teoria Quântica da Consciência [85–87], mas, os atuais estudos ainda se encontram em âmbito bastante especulativo, sem robusta evidência experimental. Nesse rol de possibilidades se inscreve o trabalho bohmiano – articulado às concepções de Pribram [88] –, o qual se coloca em uma perspectiva para além do par dualismo-monismo [89, 90].

A visão David Bohm da realidade, forjada a partir das investigações desenvolvidas no âmbito da MQ, busca a integração entre corpo e mente, matéria e consciência, *res extensa* e *res cogitans*, de um modo vanguardista e salutar. Tal movimento pode ser visto como lúdica (re)atualização da arcaica noção grega de *physis*, ressaltando *o todo e o indiviso* de uma natureza que, em luz e sombras, se oculta e se apresenta, em um singelo *dobrar-e-desdobrar*.

Referências

- [1] F.W. Bopp, *Found. Phys.* **51**, 15 (2021).
- [2] O. Pessoa Jr., *As interpretações contemporâneas da mecânica quântica* (CBPF, Rio de Janeiro, 2008).
- [3] T.P. Shestakova, *Universe* **6**, 128 (2020).
- [4] N. Bohr, *Física Atômica e Conhecimento Humano* (Contraponto, Rio de Janeiro, 1995).
- [5] M. Novaes, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **43**, e20200385 (2021).
- [6] L. De Broglie, *J. Phys. Radium* **8**, 225 (1927).
- [7] W. Heisenberg, *Zeit. f. Physik* **33**, 879 (1925).
- [8] W. Heisenberg, *Physics and philosophy* (Harper Torchbooks, New York, 1958).
- [9] W. Heisenberg e P. Jordan, *Zeit. f. Physik* **37**, 263 (1926).
- [10] O. Pessoa Jr., *Estud. Av.* **14**, 175 (2000).
- [11] O. Pessoa Jr., *Conceitos de física quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2003), v. 2.
- [12] A. Einstein, *Elementare Überlegungen zur interpretation der grundlagen der quanten-mechanik* (University of Edinburgh, Edinburgh, 1953).
- [13] R.M. Santilli, *Ratio Mathematica* **38**, 887 (2020).
- [14] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777(1935).
- [15] E. Schrodinger, *Naturwissenschaften* **23**, 807(1935).
- [16] D. Bohm, *I. Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
- [17] R. Siqueira-Batista, R.S. Batista e J.A. Helayël-Neto, *Physicae* **4**, 33 (2003).
- [18] M. Born e P. Jordan, *Z. Physik* **34**, 858 (1925).
- [19] A.S. Wightman, *Il Nuovo Cim* **110B**, 751 (1995).
- [20] D. Giulini, arXiv:0710.1516 (2009).
- [21] J. Earman, *Erkenn* **69**, 377 (2008).
- [22] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Ótica Relatividade e Física Quântica* (Edgard Blücher, São Paulo, 2014), v. 4, p. 249, 260 e 261, 4^a ed.
- [23] E. Schrodinger, *Ann. der Phys.* **79**, 361 (1926).
- [24] E. Schrodinger, *Ann. der Phys.* **79**, 734 (1926).
- [25] E. Schrodinger, *Ann. der Phys.* **80**, 437 (1926).
- [26] E. Schrodinger, *Phys. Rev.* **28**, 1049 (1926).
- [27] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A* **109**, 642 (1925).
- [28] P.A.M. Dirac, *Proc. Camb. Philos. Soc.* **23**, 69 (1926).
- [29] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A* **112**, 661 (1926).
- [30] P.A.M. Dirac, *Quantum Mechanics*. Tese de Doutorado, Universidade de Cambridge, Cambridge (1926).
- [31] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A* **113**, 621 (1927).
- [32] P.A.M. Dirac, *Proc. Camb. Philos. Soc.* **35**, 416 (1939).
- [33] M.E.M. Betz, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **36**, 430 (2014).
- [34] M. Born, *Nobel Lectures. Physics, 1942–1962* (Elsevier, Amsterdam, 1964).
- [35] R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas* (Campus, Rio de Janeiro, 1979).
- [36] R.P. Feynman, R.B. Leighton e M. Sands, *Lições de física de Feynman* (Bookman, Porto Alegre, 2008), v. 3, p. 1604.
- [37] D.J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (Prentice-Hall, New Jersey, 2005).
- [38] P.S. Laplace, em: *Gateway to the great books – Mathematics* (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1990).
- [39] J.H. Poincaré, em: *Œuvres* (Gauthier-Villars, Paris, 1913), v. 1, p. 3–84, 90–158, 167–222.
- [40] W. Heisenberg, em: *Quantum Theory and Measurement*, editado por J.A. Wheeler e W.H. Zurek (Princeton University Press, Princeton, 1983).

- [41] G.G. Rosa, N.W. Lima e C.J.H. Cavalcanti, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **44**, e20210298 (2022).
- [42] M.D. Reid, P.D. Drummond, W.P. Bowen, E.G. Cavalcanti, P.K. Lam, H.A. Bachor, U.L. Andersen, G. Leuchs, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 1727 (2009).
- [43] R. Wagner, A.W. Rosa, N.W. Lima e M.M. Nascimento, *Rev. Enseñanza de La Física* **33**, 167 (2021).
- [44] F.A.S. Barbosa, A.S. Coelho, L.F. Munoz-Martínes, L. Ortiz-Gutiérrez, A.S. Villar, P.L.F. Munoz-Martínes, F.A.S. Barbosa, A.S. Coelho, L. Ortiz-Gutiérrez, M. Martinelli et al., *Phys. Rev. A* **98**, 023823 (2018).
- [45] M.E. McCulloch e J. Giné, *Mod. Phys. Lett. B* **35**, 2150072 (2021).
- [46] D. Krause, em: *Seminário Lógica no Avião 2013–2018*, organizado por E. Almeida, A. Costa-Leite e R. Freire (UnB, Brasília, 2019).
- [47] R.S. Souza, *Ensino e Multidisciplinaridade* **7**, 42 (2021).
- [48] B.S. De Witt, *Phys. Today* **23**, 30 (1970).
- [49] O. Freire Jr., O. Pessoa Jr. e J.L. Bromberg, *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* (EDUEPB, Campina Grande, 2011), p. 456.
- [50] O. Freire Jr., *David Bohm: a life dedicated to understanding the quantum world* (Springer, Heidelberg, 2019).
- [51] O. Freire Jr., M. Paty e A.L.R. Barros, *Estud. Av.* **8**, 29 (1994).
- [52] D. Bohm, *Estud. Av.* **4**, 10 (1990).
- [53] D. Bohm, *Quantum Theory* (Prentice Hall, New York, 1951).
- [54] D. Bohm, *A totalidade e a ordem implicada* (Cultrix, São Paulo, 2001).
- [55] D. Bohm e W. Schützer, *Nuovo Cim.* **10**, 1004 (1955).
- [56] D. Bohm, *II. Phys Rev* **85**, 180 (1952).
- [57] D. Bohm, *Wholeness and the Implicate Order* (Routledge, London, 1980), p. 304.
- [58] D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (Routledge & Kegan Paul and D. Van Nostrand Company, Philadelphia, 1957), p. 192.
- [59] D. Rice, *Am. J. Phys.* **65**, 144 (1997).
- [60] R. Siqueira-Batista, R.S. Batista, R. Alves Ferreira e J.A. Helayël-Neto, *Prometeus* **8**, 110 (2015).
- [61] R. Siqueira-Batista e J. A. Helayël-Neto, *Vértices* **10**, 57 (2008).
- [62] D. Bohm, em: *Physics and the ultimate significance of time: Bohm, Prigogine, and process philosophy* (State University of New York Press, New York, 1986).
- [63] J. Brockmann, *Einstein, Gertrude Stein, Wittgenstein e Frankenstein: reinventando o universo* (Companhia das Letras, São Paulo, 1989).
- [64] C.R. Oliveira e S.I.A. Stein, *Kínesis* **8**, 13 (2016).
- [65] J. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).
- [66] D. Bohm e B.J. Hiley, *The undivided universe: an ontological interpretation of quantum theory* (Routledge, London, 1999).
- [67] R.F. Carvalho, *Sci. Stud.* **14**, 24 (2016).
- [68] C.S. Rocha e R. Ponczek, *Rev. Conatus - Filosofia de Spinoza* **10**, 11 (2018).
- [69] H. Atmanspacher, *Mind & Matter* **12**, 245 (2014).
- [70] J.C. Polkinghorne, *Teoria quântica: uma breve introdução* (L&PM, Porto Alegre, 2016).
- [71] G.A. Bornheim, *Os filósofos pré-socráticos* (Cultrix, São Paulo, 2008).
- [72] C. Talbot, *David Bohm: causality and chance, letters to three women editors* (Springer, Berlin, 2017).
- [73] C. Talbot, *David Bohm's critique of modern physics: Letters to Jeffrey Bub, 1966-1969* (Springer, Berlin, 2020).
- [74] A. Lohrey e B. Boreham, *Commun. Integr. Biol.* **14**, 221 (2021).
- [75] O. Freire Jr., *The quantum dissidents – rebuilding the foundations of Quantum Mechanics 1950 1990* (Springer, Berlin, 2015).
- [76] O. Freire Jr., *Ann. Phys. (Leipzig)* **527**, A47 (2015).
- [77] P.C.M. Delgado e N. Pinto-Neto, *Class. Quantum Grav.* **37**, 125002 (2020).
- [78] N. Pinto-Neto, *Found Phys* **35**, 577 (2005).
- [79] D. Dürr, S. Goldstein, T. Norsen, W. Struyve e N. Zanghì, *Proc. R. Soc. A* **470**, 20130699 (2014).
- [80] H. Nikolic, arXiv:quant-ph/0512065v3 (2006).
- [81] C. Adami e N.J. Cerf, arXiv:quant-ph/9806048 (1998).
- [82] M.A. Nielsen e I.L. Chuang, *Computação quântica e informação quântica* (Bookman, São Paulo, 2005).
- [83] G.M. Guimarães, *Não-localidade em sistemas quânticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (2012).
- [84] D. Georgiev, *Axiomathes* **23**, 683 (2013).
- [85] R. Penrose, *Shadows of the mind: an approach to the missing science of consciousness* (Oxford University Press, Oxford, 1994).
- [86] S. Hameroff e R. Penrose, *Phys. Life Rev.* **11**, 39, 2014.
- [87] D. Sattin, F.G. Magnani, L. Bartesaghi, M. Caputo, AV. Fittipaldo, M. Cacciatore, M. Picozzi e M. Leonardi, *Brain Sci.* **11**, 535 (2021).
- [88] K.H. Pribram, *Rethinking Neural Networks: Quantum Fields and Biological Data* (Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 1993).
- [89] M. Jamali, M. Golshani e Y. Jamali, *Heliyon* **5**, e02130 (2019).
- [90] A.A. Fingelkurts, A.A. Fingelkurts, C.F.H. Neves e T. Kallio-Tamminen, *Phys. Life Rev.* **31**, 122 (2019).