



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA**

RAONI WOHN RATH ARROYO

**O PROBLEMA ONTOLÓGICO DA CONSCIÊNCIA NA MECÂNICA
QUÂNTICA**

MARINGÁ

2015

Raoni Wohnrath Arroyo

**O PROBLEMA ONTOLÓGICO DA CONSCIÊNCIA NA MECÂNICA
QUÂNTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes da Universidade Estadual de Maringá, como condição parcial para a obtenção do grau de Mestre em Filosofia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Andrea Luisa Bucchile Faggion.

MARINGÁ

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

Arroyo, Raoni Wohnrath
A778p O problema ontológico da consciência na
mecânica quântica / Raoni Wohnrath Arroyo. --
Maringá, 2015.
166 f.

Orientadora: Profa. Dra. Andrea Luisa
Bucchile Faggion

Dissertação (Mestrado em Filosofia)-
Universidade Estadual de Maringá. Departamento
de Filosofia, Programa de Pós-Graduação em
Filosofia.

1. Metafísica. 2. Mecânica quântica -
Ontologia. 3. Medição quântica.
4. Consciência. I. Faggion, Andrea Luisa
Bucchile, orient. II. Universidade Estadual de
Maringá. Centro de Ciências Humanas, Letras e
Artes. Programa de Pós-Graduação em Filosofia.
III. Título.

21.ed. 110

Cicília Conceição de Maria
CRB9- 1066



RAONI WOHNATH ARROYO

O PROBLEMA ONTOLÓGICO DA CONSCIÊNCIA NA MECÂNICA QUÂNTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes da Universidade Estadual de Maringá, como condição parcial para a obtenção do grau de *Mestre em Filosofia* sob a orientação da Professora Dra. Andréa Luisa Bucchile Faggion.

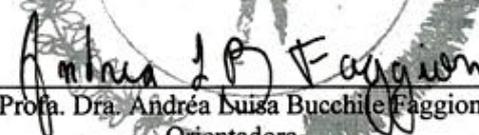
Este exemplar corresponde à versão definitiva da tese defendida perante a Banca Examinadora.

Aprovado em 14 de Agosto de 2015



Banca Examinadora


Prof. Dr. Wagner Dalla Costa Félix
Presidente da Banca


Prof. Dra. Andréa Luisa Bucchile Faggion
Orientadora


Prof. Dr. Décio Krause
Membro Externo – UFSC


Prof. Dr. Evandro Luís Gomes
Membro do Corpo Docente – UEM/PGF

Para Luana e Ananda

AGRADECIMENTOS

Seria impossível expressar minha gratidão por todas as pessoas que auxiliaram, direta ou indiretamente, tanto intelectual quanto emocionalmente, na elaboração deste trabalho – seja por falta de memória ou por evitar a demasiada extensão do texto. Arriscarei, ainda assim, com toda a certeza de que a lista será incompleta.

Primeiramente agradeço aos meus mestres, os professores e as professoras do curso de Filosofia da Universidade Estadual de Maringá, pela formação e pelas vivências. Não poderia deixar de agradecer especialmente ao professor Evandro Gomes, que me incentiva e apoia desde meu primeiro ano de faculdade até hoje.

Sou muito grato à professora Andrea Faggion por ter aceitado me orientar. Agradeço as ótimas discussões, que foram sempre determinantes para o desenvolvimento da dissertação, do seu início à conclusão. Agradeço, sobretudo, pela liberdade com que ela conduziu a orientação e pela confiança depositada em mim desde seu primeiro contato com meu trabalho.

Agradeço imensamente ao professor Décio Krause, que foi bastante gentil ao se dispor a participar deste trabalho. As riquíssimas discussões e apontamentos conduzidos por ele aprimoraram significativamente tanto o texto quanto minhas ideias.

Não poderia deixar de agradecer às secretárias Rosângela Scoaris e Andrea Previati e também ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Filosofia da UEM, Wagner Félix, pelo auxílio e constante disposição para tratar dos assuntos burocráticos que envolvem pesquisa acadêmica.

À CAPES e à Fundação Araucária, agradeço pelo apoio financeiro sem o qual não teria sido possível dedicar-me integralmente à pesquisa.

Não tenho outro sentimento senão o de gratidão para com o querido amigo William Sversutti, que há anos discute comigo intensa e prazerosamente grande parte dos assuntos abordados aqui.

Aos integrantes do grupo de estudos "Filosofia e Ciência da Natureza", em especial os membros André Marciel Souza, Fabiano Fidelis, Marcelo Araldi e Vitor Silva, agradeço pelas diversas discussões inusitadas e frutíferas.

Ao amigo Fernando Bortotti, agradeço imensamente pelas noites de discussões sobre filosofia da física e observações astronômicas.

Agradeço à minha mãe e ao meu pai, pelo constante carinho e incentivo. Agradeço especialmente à Raquel Wohnrath pelas revisões do texto.

Por fim, agradeço à Luana, minha companheira, meu amor. Pelo que vivenciamos juntos, pela compreensão devido aos dias e noites que precisei trocar sua companhia pelos livros, pelo seu carinho que me manteve sereno mesmo durante os momentos de maior tensão, enfim, gratidão por tudo o que não caberia descrever neste texto.

Foi uma honra partilhar todas essas vivências com vocês!

Is it not good to know what follows from
what, even if it is not really necessary
FAPP [“for all practical purposes”]?
Suppose for example that quantum
mechanics were found to *resist* precise
formulation. Suppose that when
formulation beyond FAPP is attempted,
we find an unmovable finger obstinately
pointing outside the subject, to the mind
of the observer, to the Hindu scriptures, to
God, or even only Gravitation? Would not
that be very, very interesting?

—John Bell

Não seria bom conhecer o que se segue, mesmo que isso não seja necessariamente FAPP [“para todos os propósitos práticos”]? Suponha, por exemplo, que a mecânica quântica acabe por *resistir* a uma formulação precisa. Suponha que, quando uma formulação para além de FAPP é tentada, encontramos um dedo imóvel apontando obstinadamente para fora do sujeito, para a mente do observador, para as escrituras hindus, para Deus, ou mesmo unicamente para a Gravitação. Isso não seria muito, muito interessante?

—John Bell

RESUMO

A mecânica quântica é uma área da Física que lida com fenômenos subatômicos. Dela pode ser extraída uma visão do mundo físico que contraria diversos aspectos de nossa percepção cotidiana, suscitando diversos debates filosóficos e admitindo diversas interpretações. Dentre a vasta gama de problemas no âmbito da interpretação da teoria quântica, existe o problema da medição. Alguns aspectos filosóficos da problemática acerca da noção de “medição” em mecânica quântica são analisados, de modo a identificar como o problema surge nos debates acerca dos fundamentos da interpretação da teoria quântica e como se mantém até mesmo nas interpretações mais recentes, conflitando de vários modos (inclusive ontológicos) com a visão de mundo que pode ser extraída da física clássica – admitindo-se que ela possa fornecer uma visão de mundo. Ainda que Bohr tenha, em diversas ocasiões, abordado a problemática da medição, não chegou a formular propriamente uma teoria da medição. Isso foi feito por von Neumann, que apresentou uma formulação axiomática de uma teoria da medição juntamente com uma crítica ao modelo de Bohr e, ao mesmo tempo, uma alternativa calcada na introdução da noção dualista de consciência (não física) com poder causal na medição quântica. É justamente a introdução do conceito dualista de consciência dentro do escopo do conceito de medição que se insere na discussão filosófica como um problema *ontológico* na medida em que se trata da introdução de uma nova entidade no universo. São analisadas as primeiras interpretações subjetivas propostas por London e Bauer, perpassando pela dificuldade solipsista colocada através dos trabalhos de Wigner às interpretações subjetivistas, até as interpretações inspiradas na obra tardia do físico Erwin Schrödinger, que propõe uma interpretação monista para a noção de “consciência”. São destacadas muito brevemente algumas atitudes distintas frente à problemática filosófica da medição, a título de amostragem, para ilustrar o caráter plural das propostas de interpretação do conceito de “medição” em mecânica quântica. Ainda que a rigor não exista uma “melhor” interpretação para a mecânica quântica, sugerimos que a formulação de uma ontologia que leve em consideração a mecânica quântica poderia auxiliar na compreensão de certos conceitos, como “medição” ou “consciência”, sem que dificuldades filosóficas – como o dualismo – ou situações paradoxais – como o solipsismo – necessariamente os acompanhassem.

Palavras-chave: ontologia, medição quântica, consciência.

ABSTRACT

Quantum mechanics is an area of Physics that deals with subatomic phenomena. It can be extracted from a vision of the physical world which contradicts many aspects of our everyday perception, prompting many philosophical debates and admitting different interpretations. Among the wide range of problems within the interpretation of quantum theory, there is the measurement problem. Some philosophical aspects of the problems concerning the notion of “measurement” in quantum mechanics are analyzed in order to identify how the problem arises in discussions about the foundations of the interpretation of quantum theory and how it holds up even in the most recent interpretations, conflicting in various ways (including ontological) with a worldview that can be drawn from classical physics – assuming that it provides a worldview. Although Bohr has, on several occasions, addressed the measurement problem, he did not get to properly formulate a measurement theory. This was done by von Neumann, who presented an axiomatic formulation of a measurement theory along with a critique of the Bohrian model and, at the same time, an alternative grounded in the introduction of a dualistic notion of consciousness (nonphysical) with causal power in quantum measurement. It is precisely the introduction of the dualistic concept of consciousness within the scope of the concept of measurement that inserts into the philosophical discussion as an ontological problem insofar as it comes to the introduction of a new entity in the universe. The first subjectivistic interpretations, proposed by London and Bauer, are analysed, passing through the solipsistic difficulty to this subjectivist interpretations placed through Wigner’s work, up to the interpretations inspired by the late work of the physicist Erwin Schrödinger, which proposes a monistic interpretation of the notion of “consciousness”. Some distinct attitudes towards measuring the philosophical problems are outlined very briefly in the form of sampling, to illustrate the plural character of the proposals for interpretation of the term “measurement” in quantum mechanics. Although strictly speaking there is no “best” interpretation of quantum mechanics, it is suggested that the formulation of an ontology that takes into account quantum mechanics could help in understanding certain concepts, such as “measurement” or “consciousness” without that philosophical difficulties – as dualism – or paradoxical situations – such as solipsism – necessarily accompany them.

Keywords: ontology, quantum measurement, consciousness.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1. A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE DA TEORIA QUÂNTICA	13
1.1 <i>O princípio da incerteza ou de indeterminação</i>	15
1.2 <i>A complementaridade</i>	27
1.3 <i>Heisenberg e Bohr</i>	47
2. ONTOLOGIA E INTERPRETAÇÃO DA MECÂNICA QUÂNTICA	53
2.1 <i>Um problema filosófico</i>	53
2.2 <i>Ontologia ou ontologias?</i>	55
2.3 <i>O artigo EPR</i>	62
2.4 <i>Einstein e Bohr</i>	70
3. O PROBLEMA DA MEDIÇÃO	85
3.1 <i>O conceito de “medição” nas físicas clássica e quântica</i>	86
3.2 <i>A teoria da medição de von Neumann</i>	89
3.3 <i>Consciência e medição quântica</i>	99
3.3.1 <i>O problema ontológico da consciência na mecânica quântica</i>	105
3.3.2 <i>Abordagens dentro do paradigma da consciência</i>	116
3.4 <i>Abordagens populares frente ao conceito de “medição”</i>	133
3.4.1 <i>A interpretação estatística</i>	134
3.4.2 <i>A interpretação causal</i>	141
3.4.3 <i>A interpretação dos estados relativos</i>	142
3.4.4 <i>A interpretação dos estados latentes</i>	145
3.4.5 <i>A interpretação do colapso espontâneo</i>	146
3.5 <i>Considerações finais</i>	147
CONCLUSÃO	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

INTRODUÇÃO

O conceito de “*medição*” ocupa um papel central na discussão acerca da *interpretação* da teoria quântica, estando presente desde os primeiros debates ontológicos da teoria conduzidos, mesmo que *indiretamente*, pelos físicos Niels Bohr e Werner Heisenberg. É um dos maiores problemas filosóficos dentro da questão interpretativa da mecânica quântica, dando à teoria quântica diversas interpretações nas quais uma metafísica própria parece estar relacionada a cada uma delas.

O conceito de “*medição*” em física clássica é um aspecto que pode nos parecer intuitivamente simples e bem pouco problemático – como o ato de *medir* o peso de uma corpo maciço tal como uma bola de bilhar. Já na mecânica quântica, a *medição* não é um conceito consensual, havendo diversas posições ontológicas conflitantes sobre seu modo de operação, de modo que questões como “a *medição cria* ou *revela* o valor observado?” permeiam o debate filosófico sobre conceito de *medição*.

Neste trabalho, buscamos destacar alguns dos aspectos filosóficos centrais no debate em torno do que se conhece como *problema da medição quântica*. Procuramos, especificamente, discutir a introdução do conceito de *consciência*, dentro do debate da *medição*, como um problema essencialmente *ontológico*. É importante esclarecer que, ao invés de defender uma ou outra posição, procuramos mostrar que existe um campo para a discussão filosófica na interpretação da teoria quântica e, como a discussão filosófica se dá por *problemas*, buscaremos explicitar os aspectos problemáticos em torno da interpretação do conceito de “*medição*”.

Para tanto, dividimos o trabalho em três capítulos. No primeiro capítulo, partimos do ponto de vista da interpretação ortodoxa da mecânica quântica. Ainda que existam vários modos de formulá-la (cf. Styer *et al*, 2002), sempre que utilizarmos a nomenclatura “*mecânica quântica*” neste estudo, temos em mente os pontos em comum entre os autores Bohr e Heisenberg, comumente referida como “*interpretação de Copenhague*”. Neste capítulo procuramos delinear definições precisas para os conceitos

envolvidos nos fundamentos desta *interpretação*, enfatizando o papel central da noção de *medição*, bem como alguns aspectos gerais de seus problemas filosóficos internos a fim de prosseguirmos com o debate mais geral nos capítulos seguintes. Expomos separadamente as formulações de Heisenberg e Bohr, considerados os principais autores da interpretação ortodoxa e, em seguida, confrontaremos os pontos de vista de ambos os autores a fim de apresentar com maior precisão o posicionamento ontológico de cada um frente à noção de medição.

No segundo capítulo, procuramos enfatizar como a problemática em torno da medição se insere no debate filosófico, especificamente numa discussão ontológica. Para tanto, buscamos *definições* para o termo “ontologia”, que são utilizadas ao longo deste estudo. Em seguida, analisaremos as críticas de Einstein à posição ortodoxa e o debate entre Einstein e Bohr, enfatizando o comprometimento ontológico dos autores no que tange à noção de medição. Com isso, podemos descrever com precisão ainda maior o ponto de vista de cada autor frente à interpretação da teoria quântica, bem como entender como o *problema da medição* se insere no debate filosófico.

No terceiro capítulo, exploramos algumas diferenças no conceito de medição entre a física *clássica* e a teoria *quântica*. Procuramos expor a teoria da medição von Neumann, de modo a delinear de forma clara o “problema da medição”. Enfatizamos as interpretações lógicas e ontológicas de sua solução para o problema da medição, que marca a introdução do conceito *dualista* de “consciência” na medição quântica, explicitando de que modo a noção de “consciência” se insere na discussão filosófica como um problema ontológico.

São analisadas as interpretações *subjetivistas*, isto é, as atitudes que se propuseram a dar continuidade na teoria de von Neumann, que atribui poder causal à noção de “consciência”, como os trabalhos de London e Bauer. Também referimos os trabalhos de Wigner que, além de pressupor a teoria de von Neumann, indicou o *solipsismo* uma dificuldade filosófica às interpretações subjetivistas.

Em seguida, analisamos brevemente algumas das propostas *pouco abordadas* na literatura especializada, que deram continuidade e extensão ontológica à formulação

de von Neumann, como a formulação de Ludwig Bass e teoria de Amit Goswami, que se utilizaram de uma formulação monista para a noção de “consciência”. Também analisamos muito brevemente algumas propostas alternativas e críticas em relação às formulações tanto de von Neumann quanto de Bohr, a título de amostragem, justamente para ilustrar a pluralidade de interpretações à noção de “medição”.

1. A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE DA TEORIA QUÂNTICA

Este capítulo se insere no plano geral do texto como uma parte preliminar da pesquisa, na qual os *termos* utilizados na discussão futura são definidos. Farias (1987, p. 8) aponta, resumidamente, cinco teses fundamentais, próprias da metafísica subjacente àquilo que se conhece por *física clássica*, das quais destacamos quatro:

- (1) A física clássica é realista, no sentido de assumir a existência de uma realidade externa com propriedades bem definidas e que independe do observador (realidade objetiva).
- (2) É determinista,¹ de modo que, se conhecemos todas as condições iniciais acerca de um dado sistema e seu meio, podemos prever com certeza o seu comportamento futuro. Ou seja, admite que os fenômenos sejam completamente descritos por leis causais.
- (3) É objetivista, no sentido que assume que a realidade seja descritível por leis que independam da presença de um observador.
- [...] [4] a localidade. Assume-se então que nenhuma informação pode viajar com velocidade infinita, ou seja, instantaneamente.

Como procuraremos expor ao longo deste capítulo, a mecânica quântica (conforme a interpretação de Copenhague) acaba por rejeitar tais teses. Analisamos separadamente as formulações de Heisenberg e Bohr, tentando delinear, da forma mais precisa quanto for possível, a definição dos principais conceitos de tais autores, que abordam, respectivamente, o *princípio da indeterminação* e a *complementaridade*. Em seguida, discutiremos também algumas das diferenças filosóficas fundamentais entre os dois autores que compõem o cerne da interpretação de Copenhague da mecânica quântica – deixando de lado a discussão de outros autores, não menos importantes, como Born, Jordan, Pauli, entre outros.

Em diversos manuais e livros-texto de física, a mecânica quântica é exposta sob a ótica da *interpretação de Copenhague* (cf. Schiff, 1949, p. 8; Dicke, Wittke, 1960, p. 27), uma interpretação que, supostamente, advém *diretamente* das formulações de

¹ Somente em casos sem colisões ou choque de partículas.

Bohr e Heisenberg (cf. Farias, 1987, p. 28), e é até mesmo considerada a *interpretação ortodoxa da mecânica quântica* (cf. Pessoa Junior, 2003). A noção de uma interpretação unitária da mecânica quântica, chamada de “interpretação de Copenhague”, de acordo com Howard (2004, p. 675), fora introduzida por Heisenberg (1955, p. 12). Até então, segundo Howard (2004, p. 680) existia apenas um chamado “espírito de Copenhague”², que representaria “[...] um grupo de pensadores unidos pela determinação de defender a mecânica quântica como uma teoria completa e correta”³, ainda que muitos destes pensadores concordassem com as implicações das relações de incerteza e da complementaridade.

Bernard d’Espagnat (1999) considera a interpretação de Copenhague uma *ferramenta prática* para a solução de problemas em se tratando de física quântica. Para que possamos discutir com a literatura, chamaremos de *interpretação de Copenhague* a adoção dos pontos de vista do *princípio da incerteza* e da *complementaridade* – conceitos que serão explicados adiante.

De acordo com Faye (2008), jamais existiu consenso sobre as implicações filosóficas ou sobre uma interpretação unitária da mecânica quântica. Exemplo disso é o fato de que os próprios teóricos fundadores da mecânica quântica, como Heisenberg e Bohr, frequentemente divergiam em questões filosóficas, como procuraremos expor ao final deste capítulo. Ainda assim, conforme observa Mara Beller (1999), os dois físicos deliberadamente ocultariam suas diferenças em nome de uma interpretação unitária de Copenhague.

Deve ficar claro que a mecânica quântica ortodoxa, estritamente falando, não oferece uma *visão de mundo* ou uma *ontologia*. Como aponta Henry Stapp (2009, p. 40), a visão ortodoxa considera que a mecânica quântica seja “meramente um conjunto de regras para fazer previsões sobre observações obtidas sob certos tipos especiais de

² Todas as citações foram traduzidas livremente para o português, seguidas do texto original (ou, em alguns casos, a tradução do texto original para o inglês) em nota de rodapé. No original: “*Copenhagen spirit*”, termo cunhado por Rosenfeld (1957).

³ No original: “[...] a group of thinkers united by the determination to defend quantum mechanics as a complete and correct theory”.

condições experimentais”⁴. No entanto, consideramos que é possível extrair uma metafísica associada à investigação da mecânica quântica. Portanto, trataremos de ontologia mesmo que os principais autores da interpretação ortodoxa não o tenham feito *explicitamente*.

Também devemos salientar que, por mais que a mecânica quântica apresente diversos problemas filosóficos (como veremos), sua capacidade de predição é bastante grande, atingindo dezenas de casas decimais de precisão, sendo uma teoria muito bem sucedida em termos da concordância de suas predições com resultados experimentais. É relevante explicitar também que a mecânica quântica não corresponde à teoria mais moderna da física – o que seria o caso das teorias quânticas de campo (*quantum field theories*). No entanto, conforme observam Arenhart e Krause (2012, p. 49), o estudo da mecânica quântica não é meramente histórico, visto que “[...] ainda há uma série de experimentos importantes sendo feitos que se baseiam apenas na mecânica quântica ortodoxa, revelando, assim, sua importância e relevância”.

1.1 O princípio da incerteza ou de indeterminação

O *princípio da incerteza* foi idealizado pelo físico Werner Heisenberg (1983 [1927]). É um dos pontos centrais (e mais famosos) daquilo que se entende por *interpretação de Copenhague*, sendo um dos aspectos que diferenciam radicalmente a física clássica da física quântica.

De acordo com Jammer (1974, p. 65), quando teve acesso ao manuscrito do (ainda não publicado) artigo de Heisenberg (1983 [1927]), Niels Bohr (1983 [1928]) teria apresentado uma série de críticas acerca da *base conceitual* sob as quais as relações foram formuladas, ainda que a *validade* das relações de Heisenberg – ou seja, *sua existência* – não fosse questionada. Nesta seção, tentamos delinear, de acordo com

⁴ No original: “[...] merely a set of rules for making predictions about observations obtained under certain special kinds of experimental conditions”.

a posição de Heisenberg, uma definição tão precisa quanto possível para o *princípio da incerteza*.

Grosso modo, o *princípio da incerteza* postula a *impossibilidade de atribuir valores exatos para certas propriedades observáveis dos objetos quânticos* (tais como “posição” e “momento”⁵) *simultaneamente, de modo que tal atribuição deva obedecer uma quantidade constante de “incerteza”*. Essa é a definição paradigmática do *princípio*, encontrada frequentemente em manuais e livros-texto de mecânica quântica e representada sob a forma da equação “ $\Delta q \Delta p \geq h$ ” (onde “q” e “p” representam os desvios padrão, isto é, as propriedades observáveis e “h” representa a *constante de Planck*⁶).

Duas questões surgem imediatamente: 1) quanto ao primeiro termo: o “*princípio da incerteza*” é, *de fato*, um *princípio* da teoria quântica? 2) quanto ao segundo termo: o “*princípio*” se refere a uma tese *epistemológica* (de fato “*princípio da incerteza*”) ou a uma tese *ontológica* (como “*princípio de indeterminação*”) ? Dissertaremos adiante o que implica levar em consideração uma referência epistemológica ou ontológica.

Para uma abordagem acerca da primeira questão, é necessário distinguir entre *relações de incerteza* e *princípio da incerteza*. Segundo Osvaldo Pessoa Júnior (2003, p. 77), cabe a seguinte distinção entre os dois termos:

O *princípio* [de incerteza], que se aplica a grandezas não compatíveis entre si [...], exprime o fato de que uma maior previsibilidade nos resultados da medição de um dos observáveis implica uma diminuição na previsibilidade

⁵ As variáveis “tempo” e “energia” podem igualmente expressar o argumento, sendo também *observáveis*. No entanto, manteremos o raciocínio com os observáveis “posição” e “momento” (frequentemente “*momentum*”), freqüentemente expressos sob a forma dos caracteres *q* e *p*, respectivamente. O termo “posição” é uma propriedade observável que designa, como o nome intuitivamente sugere, a *posição* de um objeto quântico em movimento; o termo “momento” pode ser entendido como uma propriedade observável que designa a *direção* ou a *velocidade* do movimento de um objeto quântico.

⁶ O termo “quantum”, do latim, remete à *menor unidade possível de uma quantidade física*, tal como “energia” ou “matéria”. A “*física quântica*” trata dos fenômenos em uma escala subatômica, de aproximadamente 10^{-33} cm. Nela, quantidades extremamente reduzidas são significativas. Talvez a quantidade quântica mais significativa seja a “constante de Planck”, nomeada em homenagem ao físico Max Planck, que é uma representação matemática do *movimento* dos objetos quânticos numa escala de 10^{-34} joules por segundo, expressa pelo símbolo “h”.

do outro. Uma *relação* de incerteza é qualquer relação matemática que exprima quantitativamente o princípio.

Na física *clássica*, todas as grandezas são compatíveis, o que não acontece na mecânica quântica. As *relações de incerteza* são consequências do formalismo da mecânica quântica que, segundo Farias (1987, p. 118), “podem ser derivadas tanto dentro do contexto do formalismo quanto fora dele, sendo expressões matemáticas aparentemente indiscutíveis no que tange à sua existência”⁷. De fato, esta é uma das críticas tecidas por Karl Popper (1967) ao princípio da incerteza: as relações não poderiam alcançar o *status* de princípio da teoria quântica por uma questão de prioridade lógica. As relações são derivadas da própria teoria quântica, de modo que seria impossível fazer o caminho inverso e obter a teoria quântica a partir das relações de incerteza.

Para Reichenbach (1944, p. 13), no entanto, o *princípio* é uma “afirmação empírica”. Assim, a questão em torno da utilização ou não das relações de incerteza sob o nome de “princípio” deveria se dar no sentido empírico do termo, na medida em que as relações são apresentadas originalmente como um resultado experimental (ainda que de um experimento mental, como veremos a seguir). Da forma como interpretam Hilgevoord e Uffink (2014), Heisenberg expressaria que relações de incerteza seriam um princípio fundamental da natureza, isto é, imposto como uma lei empírica, ao invés de ser tomado como um resultado derivado do formalismo da teoria.

O *princípio da incerteza* é uma *interpretação* agregada às relações (matemáticas) de incerteza, frequentemente associada àquilo que se entende por *interpretação de Copenhague* (cf. Farias, 1987). De acordo com Cassidy (1998), Heisenberg nunca teria endossado o ponto de vista de que suas *relações* fossem de fato um *princípio* da mecânica quântica. Segundo o autor, para designar o argumento exprimido através do suposto *princípio da incerteza* (como ficara popularmente conhecido), Heisenberg

⁷ Para uma apresentação das derivações das relações de incerteza, ver Farias (1987, pp. 120-126).

utilizava os termos “relações de imprecisão” (*inaccuracy relations*, *Ungenauigkeitsrelationen*) ou “relações de indeterminação” (*indeterminacy relations*, *Unbestimmtheitsrelationen*).

Como não entraremos aqui na discussão relativa ao *formalismo da teoria quântica*, a discussão que se seguirá, para o escopo deste trabalho, será relativa àquilo que se refere ao *princípio*. Adotamos, por ora, a nomenclatura “relações de Heisenberg” (ou somente as “relações”) para nos referirmos ao que fora chamado até aqui de *princípio da incerteza*, assim não nos comprometeremos – ao menos *de antemão* – com alguma interpretação, como as explicitadas acima.

A tentativa de responder à segunda questão esbarra na dificuldade de *não haver uma única terminologia*, na medida em que não existe um consenso para a interpretação das relações. Para uma melhor compreensão do significado das *relações de Heisenberg*, examinaremos o raciocínio do próprio autor. O título do artigo de 1927, no qual as *relações* são formuladas, parcialmente traduzido para o português, seria: “Sobre o conteúdo “*anschaulich*” da teoria quântica cinematográfica e mecânica⁸”. De acordo com Hilgevoord e Uffink (2014), o termo “*anschaulich*” merece atenção especial. É uma palavra *própria* da língua alemã, cuja tradução para outros idiomas é frequentemente *ambígua*, de modo que a expressão “conteúdo *anschaulich*” tem diversas traduções.

Wheeler e Zurek (1983), em sua coletânea de artigos, traduziram o título do artigo para “*the physical content*” (“o conteúdo *físico*”); Cassidy (1992), biógrafo de Heisenberg, traduziu este título como “*the perceptible content*” (“o conteúdo *perceptível*”). A tradução literal mais aproximada seria “conteúdo *visualizável*”. Como a visão é frequentemente utilizada como uma metáfora para o entendimento da questão proposta, Hilgevoord e Uffink (2014) sugerem a tradução “conteúdo *inteligível*”. Para Heisenberg (1983 [1927], p. 64), o que garante *anschaulich* a um conceito físico é sua correspondência biunívoca com uma operação experimental

⁸ Tradução nossa. No original: “Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”.

especificamente feita para a aplicação de tal conceito, de modo a deixar claro que a palavra “*anschaulich*” não se refere a um conteúdo *puramente inteligível*, que poderia ser entendido como um conteúdo puramente conceitual, sem correspondente experimental; assim, sugerimos que a expressão tenha o sentido mais próximo ao “conteúdo manifesto”, da forma como enuncia através da seguinte passagem:

Quando alguém quiser ter clareza sobre o que se deve entender pelas palavras “posição do objeto”, por exemplo do elétron (relativamente a um dado referencial), é preciso especificar experimentos definidos com o auxílio dos quais se pretenda medir a “posição do elétron”; caso contrário, a expressão não terá significado.⁹

Em outras palavras, se trata de um postulado que declara que apenas as propriedades que forem a princípio *observáveis* devem se inserir na teoria. Tal atitude fora identificada como uma posição *operacionista* dos conceitos físicos (cf. Jammer, 1974, p. 63), associada ao *positivismo*¹⁰ (cf. Chibeni, 2005, p. 7). Adotaremos a partir daqui a nomenclatura, de acordo com Pessoa Júnior (2003, p. 74), de “postulado operacionista” para a passagem citada acima.

Para exemplificar este postulado, Heisenberg (1983 [1927], p. 64, ênfase nossa) introduz um experimento de pensamento – posteriormente conhecido como “*microscópio de Heisenberg*” – no qual se quer efetuar uma medição de *posição* sobre um elétron a partir de um microscópio de raios γ (gama)¹¹. Para fazê-lo, seria preciso *iluminar* o elétron. No entanto, a tentativa de iluminar um elétron (e assim medir sua posição) *deve envolver ao menos um fóton*, cuja interação com o elétron pode ser

⁹ No original: “When one wants to be clear about what is to be understood by the words ‘position of the object,’ for example of the electron (relative to a given frame of reference), then one must specify definite experiments with whose help one plans to measure the ‘position of the electron’; otherwise this word has no meaning”.

¹⁰ Ao mencionar o termo “positivismo”, tem-se em mente, principalmente, a defesa dos aspectos *empiricista* e *verificacionista* da ciência (cf. Creath, 2014), segundo os quais a *experiência* (ou a *medição*) é condição necessária para a formulação de enunciados científicos. Tais termos serão discutidos no capítulo seguinte.

¹¹ Os raios gama têm o menor comprimento de onda conhecido até então do espectro luminoso. A ideia de utilizá-los para iluminar o elétron vem, de acordo com Chibeni (2005, p. 4), de uma propriedade matemática geral do processo de tal medição, segundo a qual se obtém maior precisão quanto menor for o comprimento de onda da luz que iluminará o elétron.

considerada uma *colisão* de modo a implicar em uma *perturbação no momento do elétron*¹² – o que limitaria a precisão do conhecimento sobre tal *momento*. Este fenômeno é conhecido como “efeito Compton”¹³:

No instante de tempo em que a posição é determinada, isto é, no instante em que o fóton é disperso pelo elétron, o elétron sofre uma mudança descontínua no momento. Esta mudança é maior [...] quanto mais exata for a determinação da posição. No instante em que a posição do elétron é conhecida, seu momento poderá ser conhecido apenas por magnitudes que correspondam a esta mudança descontínua; assim, quanto mais precisamente for determinada a posição, menos precisamente o momento é conhecido, e vice-versa.¹⁴ (HEISENBERG, 1983 [1927], p. 64, ênfase nossa).

Esta é a *primeira formulação* das relações de Heisenberg, que implicam, à primeira vista, uma tese *epistemológica*, na medida em que se relaciona com uma limitação do *conhecimento* acerca dos valores observáveis. Tal formulação induz a uma conclusão preliminar acerca de uma drástica ruptura entre os conceitos “clássicos” e “quânticos”: os conceitos (tais como *posição* e *momento*) teriam, na teoria física clássica, *definições* exatas (isto é, limitadas somente pela imprecisão dos instrumentos de medida), o que não acontece na física *quântica*, visto que os conceitos agora obedecem a uma limitação imposta pela operação experimental, impedindo assim que a “definição” dos conceitos seja simultaneamente exata (cf. Heisenberg, 1983 [1927], p. 68).

Também uma tese semântica está implicada aqui. Como observam Hilgevoord e Uffink (2014), o postulado operacionista especifica que um experimento garante *significado* a um conceito tal como “posição”, de modo que a atitude de, por exemplo, “efetuar uma medição de posição sobre um elétron” acaba por atribuir *significado* à

¹² Distúrbio este que é maior quando menor for o comprimento de onda da luz que colide com o elétron.

¹³ Para um detalhamento físico-teórico deste fenômeno, ver Chibeni (2005, p. 8) e Farias (1987, pp. 128-129).

¹⁴ No original: “At the instant when position is determined – therefore, at the moment when the photon is scattered by the electron – the electron undergoes a discontinuous change in momentum. This change is the [...] the more exact the determination of the position. At the instant at which the position of the electron is known, its momentum therefore can be known up to magnitudes which correspond to that discontinuous change. Thus, the more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known, and conversely”.

posição do objeto quântico em questão. A formulação das relações de Heisenberg parece indicar, para além do que se pode *conhecer* acerca dos observáveis, uma limitação acerca do que se pode *dizer* dos conceitos físicos em dada operação experimental. Assim, os autores propõem o uso da nomenclatura “princípio de medição=significado”.

No entanto, Heisenberg (1983 [1927], p. 73, ênfase nossa) exhibe uma *segunda formulação* das relações, de carácter *ontológico*, quando afirma: “acredito que se possa formular proveitosamente a origem da [noção de] ‘órbita’ clássica da seguinte maneira: a ‘órbita’ passa a existir somente quando a observamos”¹⁵. De acordo com tal formulação, a medição não apenas garante *significado* para uma propriedade observável de um objeto quântico, mas de fato *garante realidade física* para tal conceito. Hilgevoord e Uffink (2014) propõem, para este raciocínio, o uso da nomenclatura “princípio de medição=criação”¹⁶.

De acordo com o quadro conceitual exposto acima, a medição dos observáveis (no caso, *posição* e *momento*) parece proceder da seguinte maneira: quando a *posição* é medida pelo princípio de *medição=significado*, pode-se atribuir significado epistemológico ao conceito físico “*posição do elétron*”; além disso, pelo princípio de *medição=criação*, pode-se atribuir realidade física à noção de *posição*, tal que, dada a relação de incerteza, impossibilitaria a medição simultânea do outro observável (o *momento*) uma precisão arbitrariamente grande. Deve-se notar que a definição de alguma das propriedades observáveis (neste exemplo, o *momento*) é imprecisa num sentido *ontológico* (de acordo com o princípio de *medição=criação*), de modo que só se pode atribuir à realidade do elétron um momento impreciso (cf. Hilgevoord e Uffink, 2014).

¹⁵ No original: “I believe that one can fruitfully formulate the origin of the classical “orbit” in this way: the “orbit” comes into being only when we observe it”.

¹⁶ Que, como discutiremos adiante, Heisenberg (1958) afirma posteriormente que não se trataria de uma *criação*, mas de uma *atualização de potencialidades*, remetendo aos conceitos de “ato” e “potência” dos analíticos posteriores de Aristóteles (*Órganon*, 99b28-29). Para uma análise aprofundada do conceito de “potencia” em Heisenberg (1958), ver Pangle (2014).

Até aqui, parece seguro definir as relações de Heisenberg como *a impossibilidade de medição das propriedades observáveis de um objeto quântico com precisão arbitrariamente grande*. Anos mais tarde, Heisenberg (1930, p. 20, ênfase nossa) exhibe uma definição de suas relações de forma ainda mais precisa:

O princípio da incerteza se refere ao grau de indeterminação no possível conhecimento *presente* de valores simultâneos de várias quantidades com as quais a teoria quântica lida; ele não se restringe, por exemplo, à exatidão de uma única medição de posição ou de velocidade. Assim, suponhamos que a velocidade de um elétron livre é conhecida com precisão, enquanto que sua posição é completamente desconhecida. Assim, o princípio afirma que cada observação subsequente da posição irá alterar o momento por um valor desconhecido e indeterminável tal que, após a realização da experiência, nosso conhecimento do movimento do elétron é restringido pela relação de incerteza. Isso pode ser expresso em termos gerais e concisos ao dizer que cada experimento destrói parte do conhecimento do sistema, que fora obtido por experimentos anteriores. Esta formulação torna claro que *a relação de incerteza não se refere ao passado; se a velocidade do elétron é previamente conhecida e a posição é medida com exatidão, a posição para os tempos anteriores a tal medição pode ser calculada*. Então, para tais tempos [...] [a relação de incerteza] é menor do que o limite usual, *mas este conhecimento do passado é de caráter puramente especulativo visto que nunca* (devido à alteração desconhecida do momento causada pela medição da posição) *pode ser usado como condição inicial em qualquer cálculo da progressão futura do elétron e, portanto, não pode ser objeto de verificação experimental. É uma questão de crença pessoal se se pode ou não atribuir realidade física ao cálculo relativo à história passada do elétron*¹⁷.

¹⁷ No original: “The uncertainty principle refers to the degree of indeterminateness in the possible present knowledge of the simultaneous values of various quantities with which the quantum theory deals; it does not restrict, for example, the exactness of a position measurement alone or a velocity measurement alone. Thus suppose that the velocity of a free electron is precisely known, while the position is completely unknown. Then the principle states that every subsequent observation of the position will alter the momentum by an unknown and undeterminable amount such that after carrying out the experiment our knowledge of the electronic motion is restricted by the uncertainty relation. This may be expressed in concise and general terms by saying that every experiment destroys some of the knowledge of the system which was obtained by previous experiments. This formulation makes it clear that the uncertainty relation does not refer to the past; if the velocity of the electron is at first known and the position then exactly measured, the position for times previous to the measurement may be calculated. Then for these past times [...] [the uncertainty] is smaller than the usual limiting value, but this knowledge of the past is of a purely speculative character, since it can never (because of the unknown change in momentum caused by the position measurement) be used as an initial condition in any calculation of the future progress of the electron and thus cannot be subjected to experimental verification. It is a matter of personal belief whether such a calculation concerning the past history of the electron can be ascribed any reality or not” (HEISENBERG, 1930, p. 20). Pode-se notar que a terminologia utilizada para as relações é “uncertainty”, ou seja “incerteza”, o que sugere uma interpretação epistemológica. No entanto, da forma como argumentam Hilgevoord e Uffink (2014), tal uso é mais uma menção a prática comum da utilização de seu argumento do que uma interpretação rigorosa das relações.

Nesta definição a ênfase é dada no fato de que os valores dos observáveis *podem ser conhecidos* precisamente, o que *parece* contradizer a definição clássica das relações de incerteza. No entanto, Heisenberg (1930, p. 20) afirma que as relações não se aplicariam para valores de medições passadas, de modo que *os valores passados não podem ser utilizados para os cálculos futuros, pois cada nova medição perturba descontinuamente o valor de um dos observáveis* de maneira, a princípio, incontrolável.

Como observa Jammer (1974, p. 68), a limitação imposta pelas relações de Heisenberg não impõe uma restrição à *definição* dos observáveis visto que, se considerados isolados, podem ser medidos com precisão arbitrariamente grande. As relações se aplicam somente à tentativa de *medição simultânea dos dois observáveis*.

Quanto ao estatuto ontológico relativo à “história passada” dos observáveis (ou seja, dos valores “precisos” dos observáveis em medições passadas e isoladas), Heisenberg (1930, p. 20) relega ao plano da “crença pessoal”, visto não haver possibilidade de referir um aparato experimental próprio para verificar tal noção. Sua própria “crença pessoal” é, segundo o raciocínio de Hilgevoord e Uffink (2014), negar sua realidade física se for levado em consideração o princípio de medição=criação.

Ainda assim se mantém a questão acerca do que as relações de Heisenberg *de fato* expressam (ainda que as alternativas *não* sejam exclusivas): (i) uma limitação experimental sobre o que se pode conhecer acerca dos objetos quânticos, uma *incerteza*; (ii) uma restrição acerca do significado que se pode atribuir à definição dos objetos quânticos, uma *indefinição*; (iii) uma restrição ontológica quanto às propriedades observáveis dos objetos quânticos, uma *indeterminação*.

O extenso debate acerca da interpretação das *relações de Heisenberg* reflete na própria existência de diversas nomenclaturas para as relações de Heisenberg. Jammer (1974, pp. 61-62) identifica três termos distintos, utilizados por Heisenberg no artigo de 1927, para se referir ao argumento de suas *relações*: (1) *Ungenauigkeit*, que denota “inexatidão” ou “imprecisão” (*inexactness, imprecision*); (2) *Unbestimmtheit*,

que denota “indeterminação” (*indeterminacy*); (3) *Unsicherheit*, que denota “incerteza” (*uncertainty*).

Da mesma forma, existem três usos distintos do argumento. Se a ênfase é dada na (a) *ausência de conhecimento subjetivo acerca das propriedades dos objetos quânticos*, utiliza-se a aceção (1) – há uma *incerteza* de caráter *epistemológico*. Se a ênfase é dada na (b) *ausência de conhecimento objetivo, independente de observador, acerca das propriedades dos objetos quânticos*, utiliza-se a aceção (2) – há uma *indeterminação* de caráter *ontológico*. O termo (3) é utilizado de forma neutra, para quando tal ênfase não for dada.

De acordo com Hilgevoord e Uffink (2014), Heisenberg transita livremente das implicações epistemológicas para as implicações ontológicas. Segundo Pessoa Júnior (2003, p. 78), o motivo pelo qual as relações de Heisenberg transitam de uma tese *epistemológica* para uma tese *ontológica* é justamente a assunção do postulado operacionista:

[...] após mostrar que há uma impossibilidade de se poder *medir* com exatidão as duas grandezas conjugadas [posição e momento], ele [Heisenberg] conclui que um objeto nunca *possui*, simultaneamente, valores exatos para as duas grandezas. Esta conclusão, que passa de uma tese epistemológica (relativa ao conhecimento: “não posso conhecer”) para uma tese ontológica (relativa ao ser, à essência das coisas: “não é”), só é possível se for adotado um postulado positivista (operacionista), segundo o qual só aquilo que é observado tem realidade [...].

De fato, tal postulado é, além do ponto de partida do argumento, a base conceitual das relações de Heisenberg, na medida em que tanto as implicações epistemológicas quanto ontológicas das *relações* se fundamentam no ato de *medição*, interpretada aqui como a operação experimental. Se as relações demonstram que não é possível medir as propriedades observáveis de um objeto quântico de forma *precisa* e *simultânea*, isto quer dizer que, em última análise, tais propriedades nem sequer *existem* simultaneamente de forma determinada. Disso se segue logicamente que, devido ao fato de não *existirem* de forma determinada, não podem ser *conhecidas* ou

definidas de forma determinada. Assim, por mais que Heisenberg dê menos atenção às implicações ontológicas desse argumento (cf. Hilgevoord e Uffink, 2014), elas parecem ocupar um lugar central no plano conceitual das relações, tal que as implicações epistemológicas parecem *derivar* da implicação ontológica do princípio medição=criação. Portanto, parece seguro caracterizar que, para Heisenberg, as relações são entendidas como *relações de indeterminação*. Isto é, se assumido o postulado operacionista, que parece ser o cerne do argumento de Heisenberg (1983 [1927]), o sentido ontológico é *condição necessária* para as implicações epistemológicas e semânticas.

No entanto, Jammer (1974, p. 76) considera “estranha” e até mesmo “inconsistente” a atitude de classificar o raciocínio de Heisenberg como *positivista*, conforme a adoção do *postulado operacionista* parece sugerir. A motivação para o raciocínio das relações de indeterminação fora fortemente influenciada por uma conversa com o físico e filósofo Albert Einstein, como reconhece o próprio Heisenberg (1996 [1969], p. 95). Da forma como Heisenberg (1996 [1969], p. 78, ênfase nossa) transcreve, o raciocínio de Einstein seria o seguinte: “em princípio é um grande erro tentar fundamentar uma teoria apenas nas grandezas observáveis. Na realidade, *dá-se exatamente o inverso*. É a teoria que decide o que podemos observar”. Tal raciocínio acerca do significado do termo “observação” parece indicar uma ordem das razões *oposta* à proposta positivista para as ciências – na qual as teorias deveriam *partir* dos dados observáveis.

Em uma entrevista conduzida por Thomas Kuhn (1963, sec. XVIII, ênfase nossa), Heisenberg esclarece este ponto:

Ele [Einstein] explicou-me que o que se observa ou não é decidido pela teoria. Somente quando você tem a teoria completa, você pode dizer o que pode ser observado. *A palavra observação significa que você faz algo que é consistente com as leis físicas conhecidas. Então se você não tem leis físicas, você não observa nada.* Bem, você tem impressões e você tem algo em sua chapa fotográfica, mas você não tem nenhuma maneira de ir da placa para os

átomos. Se você não tem nenhuma maneira de ir de placa para os átomos, qual a utilidade da placa?¹⁸

A referida *teoria* (que deve preceder a *observação*) seria, no entendimento de Heisenberg, a *matemática*.

Bem, nós temos um esquema matemático consistente e este esquema matemático consistente nos diz tudo o que pode ser observado. *Não existe algo na natureza que não possa ser descrito por este esquema matemático. [...] [O]ndas e corpúsculos são, com certeza, um modo de expressão, e nós chegamos a estes conceitos através da física clássica. A física clássica nos ensinou a falar acerca de partículas e ondas, mas desde que a física clássica não é verdadeira lá [na física quântica], por que devemos nos ater tanto a estes conceitos? Por que não dizer simplesmente que não podemos usar esses conceitos com uma precisão muito elevada? Daí as relações de incerteza, e disso que nós temos que abandonar estes conceitos até certo ponto. Então ficamos além deste limite da teoria clássica, e devemos perceber que nossas palavras não são adequadas. Elas não têm de fato base na realidade física e, portanto, um novo esquema matemático seria melhor que elas, porque o novo esquema matemático diz o que pode e o que não pode estar lá. A natureza de alguma forma segue tal esquema.*¹⁹ (KUHN, 1963, sec. XVIII, ênfase nossa)

O argumento original das relações de Heisenberg (sob o exemplo do microscópio de raios gama), de acordo com Redhead (1987, p. 67), infere que “uma partícula descrita classicamente se ‘infecta’ com as relações de incerteza da MQ

¹⁸ No original: “He had explained to me that what is observed or not is decided by theory. Only when you have the complete theory can you say what can be observed. The word observation means that you do something which is consistent with the known physical laws. So long as you have no laws in physics you don’t observe anything. Well, you have impressions and you have something on your photographic plate, but you have no way of going from the plate to the atoms. If you have no way of going from the plate to the atoms, what is the use of the plate?”

¹⁹ “Well, we have a consistent mathematical scheme and this consistent mathematical scheme tells us everything which can be observed. Nothing is in nature which cannot be described by this mathematical scheme. [...] waves and corpuscles are, certainly, a way in which we talk and we do come to these concepts from classical physics. Classical physics has taught us to talk about particles and waves, but since classical physics is not true there, why should we stick so much to these concepts? Why should we not simply say that we cannot use these concepts with a very high precision, therefore the uncertainty relations, and therefore we have to abandon these concepts to a certain extent. Then we get beyond this range of the classical theory, we must realize that our words don’t fit. They don’t really get a hold in the physical reality and therefore a new mathematical scheme is just as good as anything because the new mathematical scheme then tells what may be there and what may not be there. Nature just in some way follows the scheme.”

[mecânica quântica] quando interage com um agente quântico em uma medição”²⁰. Isso parece indicar, no limite, a rejeição por parte de Heisenberg da *descrição* clássica (tais como *ondas* e *partículas*) para os objetos quânticos. Para Jammer (1974, p. 68), isto é notável, visto que *a formulação matemática* da teoria, na concepção de Heisenberg, *permitiria a predição de todo e qualquer experimento*, de modo que a utilização de termos clássicos, tais como “ondas” ou “partículas”, seria obsoleta – diante de tal *esquema matemático* – para a descrição do que ocorre em uma medição quântica.

Pela definição, ainda em linhas gerais, que buscamos apresentar para o princípio de Heisenberg (1983 [1927]), chamaremos de *princípio de indeterminação*, dada a ênfase nos pressupostos ontológicos subjacentes ao raciocínio de sua formulação. É relevante constatar que o princípio de Heisenberg ilustra o rompimento com um dos pressupostos mais fortes das teorias físicas até então, o *determinismo*²¹, sendo uma das características mais radicais da mecânica quântica e não que até hoje não fora refutado (cf. Feynman, Leighton, Sands, 2010, p. 28). Passemos à análise de alguns aspectos centrais da formulação da *complementaridade* de Bohr para que possamos definir com maior precisão a noção de *interpretação de Copenhague*.

1.2 A complementaridade

Juntamente com as *relações de indeterminação* de Heisenberg, a noção de *complementaridade*, formulada por Niels Bohr (1983 [1928]), contém o cerne daquilo que se conhece por *interpretação de Copenhague*, muitas vezes chamada de *interpretação da complementaridade* ou *interpretação ortodoxa* da mecânica quântica. No entanto, o termo “complementaridade” tem, de acordo com Jammer (1974, pp. 88-89), usos

²⁰ No original: “[...] a classically described particle gets ‘infected’ with the QM uncertainty relations when it interacts in a measurement situation with a quantal agent”.

²¹ A problemática em torno da identificação (ou não) da noção de *determinismo* com a noção de *causalidade* não será abordada neste estudo. Para uma discussão aprofundada acerca de tal assunto, ver Leite (2012) e Paty (2004).

muito distintos e fora aplicado a diversas outras áreas do conhecimento, tais como ética, linguística, psicologia e teologia. No contexto da física – sobre o qual nos ateremos exclusivamente – o termo tem diversos usos filosóficos distintos, com implicações epistemológicas (como o próprio Bohr parece sugerir), lógicas e até mesmo ontológicas. Buscaremos evidenciar tais implicações ao longo deste capítulo.

Ater-nos-emos, a princípio, à formulação original de Bohr (1983 [1928]), na tentativa de reconstruir uma definição tão precisa quanto possível do termo *complementaridade*, entendendo que enfrentaremos uma série de dificuldades, na medida em que nem mesmo Bohr delineou uma definição clara para aquilo que diz respeito ao conceito *complementaridade* (cf. Jammer, 1974, p. 95; Faye, 1991, p. 142).

O termo aparece pela primeira vez em uma palestra de Bohr (1983 [1928]) ministrada em 1927, na cidade italiana de Como, conhecida como “*Como lecture*”, e publicada no ano seguinte na revista científica *Nature*. A argumentação conduzida por Bohr (1983 [1928]) se dá por duas premissas e uma conclusão. São elas (cf. Bohr, 1983 [1928], p. 88): (P₁) os conceitos clássicos são indispensáveis para a descrição dos experimentos quânticos; (P₂) a indivisibilidade dos fenômenos quânticos é um fato imposto pela natureza e deve ser aceito como tal – isto é, como cada medição envolve a troca de uma quantidade finita de energia (de ao menos, um *quantum*), nenhuma medição seria rigorosamente idêntica à outra e, por isso, fala-se na indivisibilidade ou *individualidade* dos fenômenos quânticos –: (C₁) o uso dos conceitos clássicos tem sua limitação na descrição dos fenômenos quânticos.

Iniciaremos nossa análise partindo da premissa (P₂). Uma das principais características que diferencia as teorias clássica e quântica seria a introdução do *postulado quântico* contido na premissa de que: “[...] atribui a qualquer processo atômico uma *descontinuidade essencial*, ou ainda uma individualidade, completamente estranha para as teorias clássicas [...]”²² (BOHR, 1983 [1928], p. 88, ênfase nossa). É

²² No original: “[...] essence may be expressed in the so-called quantum postulate, which attributes to any atomic process an essential discontinuity, or rather individuality, completely foreign to the classical theories [...]”.

precisamente a *essa* descontinuidade inerente ao processo de medição que Heisenberg se refere nas *relações de indeterminação*. Tal postulado declara que toda e qualquer interação entre (ao menos) dois sistemas é caracterizada pela troca de energia de (ao menos) *um quantum*, de modo que *qualquer medição envolve uma interação entre o fenômeno quântico e as agências de medição*²³.

Dado o postulado quântico e suas consequências para o ato de medição, Bohr (1983 [1928], pp. 89-90, ênfase nossa) é capaz de enunciar pela primeira vez o sentido do termo “*complementaridade*”:

Por um lado, a definição do estado de um sistema físico, como entendido comumente, alega a eliminação de todas as interferências externas. Mas, nesse caso, de acordo com o postulado quântico, qualquer observação será impossível, e, acima de tudo, os conceitos de espaço e tempo perdem imediatamente o seu significado. Por outro lado, se, para tornar a observação possível, temos que permitir certas interações com agências apropriadas de medição que não pertençam ao sistema, uma definição não ambígua do estado do sistema naturalmente não é mais possível, e a causalidade, no sentido comum da palavra, está fora de questão. A própria natureza da teoria quântica nos obriga, portanto, a considerar a coordenação espaço-tempo e a alegação da causalidade, a união que caracteriza as teorias clássicas, como características complementares, mas exclusivas, da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição respectivamente.²⁴

Diversas considerações podem ser extraídas do trecho acima, que é a primeira vez em que Bohr se refere ao termo “*complementaridade*”. Chamamos a atenção aos seguintes pontos, respectivamente relativos às três passagens grifadas na citação acima: (i) a resignificação do conceito clássico de *observação*; (ii) o *operacionismo*; (iii)

²³ O termo “*agência de medição*” é utilizado com frequência nos escritos de Bohr, o que talvez indique uma posição de *neutralidade* em relação a o *quê* de fato seria a causa da medição, de modo a não se comprometer com as ambiguidades contidas em termos como “*observação*” que poderiam remeter a um aspecto humano.

²⁴ No original: “*On one hand, the definition of the state of a physical system, as ordinarily understood claims the elimination of all external disturbances. But in that case, according to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time lose their immediate sense. On the other hand, if in order to make observation possible we permit certain interactions with suitable agencies of measurement, not belonging to the system, an unambiguous definition of the state of the system is naturally no longer possible, and there can be no question of causality in the ordinary sense of the word. The very nature of the quantum theory thus forces us to regard the space-time co-ordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as complementary but exclusive features of the description, symbolizing the idealization of observation and definition respectively.*”

as *variáveis complementares*. O ponto (i) deixa claro que, uma vez assumido o *postulado quântico*, uma observação *passiva* de um *objeto isolado* não seria possível, uma vez que, na teoria quântica, há a troca de energia discreta (de ao menos um *quantum*) entre a *agência de medição* e o *objeto* medido. Tal inter-relação acaba por *aparentemente* desconstruir a linha, clara na teoria clássica, que distingue *sujeito e objeto* (cf. Bohr, 1983, p. 126).

O ponto (ii), que chamamos de *operacionismo*, parece ter as mesmas consequências do *postulado operacionista* proposto por Heisenberg (1983 [1927], p. 64) na formulação das relações de indeterminação, na medida em que admite *significado* somente aos conceitos sobre os quais se possa indicar uma operação experimental. Isto se torna notável em várias passagens da palestra de Como, quando, por exemplo, Bohr (1983 [1928], pp. 91-92, ênfase nossa) admite que a “[...] radiação em espaços livres assim como partículas materiais isoladas são *abstrações*, suas propriedades na teoria quântica são definíveis e observáveis apenas através de sua interação com outros sistemas”²⁵. Em um sentido ontológico mais forte, afirma que “[...] uma realidade independente, no sentido físico usual [clássico], não pode ser atribuída nem ao fenômeno nem às agências de observação.”²⁶ (BOHR, 1983 [1928], p. 89).

Assim, o ponto (ii) parece enfatizar, de acordo com Hilgevoord e Uffink (2014), que o contexto experimental *define* aquilo que pode ser *significativamente atribuído à descrição* de um objeto quântico, ao invés de *alterar propriedades pré-existentes* em tal objeto. De fato, a última colocação é uma interpretação possível da primeira formulação da complementaridade expressa por Bohr (1983 [1928]). Entretanto, ao conflitar com o *operacionismo* do ponto (ii) sublinhado acima, tal interpretação fora veementemente combatida por Bohr na defesa da *completude* da

²⁵ No original: “[...] radiation in free space as well as isolated material particles are abstractions, their properties on the quantum theory being definable and observable only through their interaction with other systems.”

²⁶ No original: “[...] an independent reality in the ordinary physical sense can neither be ascribed to the phenomena nor to the agencies of observation.”

mecânica quântica na segunda metade da década de 30, assunto que trataremos em detalhe no capítulo seguinte.

Os dois pontos citados acima carregam notáveis consequências filosóficas ao raciocínio de Bohr. Por ora, deixaremos de lado a discussão em torno de tais implicações, e enfatizaremos o ponto (iii) a fim de delinear uma definição clara para o termo “*complementaridade*”. O raciocínio utilizado por Bohr nesta passagem é de que a complementaridade seria relativa a *modos de descrição* mutuamente exclusivos, que seriam: (a) a descrição ou coordenação *espaço-temporal* de um objeto quântico e (b) a descrição *causal* ou a *alegação da causalidade* de tal objeto.

Enquanto a noção (a) é de certa forma mais clara, a variável (b) merece mais atenção. A opção de Bohr da definição da variável (b), identificada como *causalidade*, se refere, segundo Jammer (1974, p. 95, ênfase nossa) “aos teoremas de conservação de energia e momento”²⁷, o que Patrícia Kauark-Leite (2012, p. 171) identifica como “o determinismo causal do formalismo matemático”; de fato, assegura Kauark-Leite (2012, p. 170), o formalismo da teoria quântica, sob a representação matemática da evolução temporal de uma *função de onda*, seria *sempre* determinista, quer seja pelo formalismo de Dirac, Heisenberg ou Schrödinger. Em sua formulação original, as *variáveis complementares* – ou *observáveis* ou *variáveis conjugadas* – (a) e (b) denotam a *incompatibilidade* de qualquer tentativa de, simultaneamente, se atribuir validade a uma descrição espaço-temporal das leis matemáticas (cf. Kauark-Leite, 2012, p. 170-171).

Como aponta Jammer (1974, p. 102), Bohr não utiliza os termos “*posição*” e “*momento*”, ou “*partícula*” e “*onda*”, na palestra de Como, ainda que *pudesse tê-lo feito facilmente*. De fato, como notam Hilgevoord e Uffink (2014), as variáveis de *posição* e *momento* seriam os *melhores exemplos* para tratar da *complementaridade* de Bohr, num sentido de *clareza* ou *praticidade*, uma vez que são estas as variáveis utilizadas nos debates *em relação à interpretação de Bohr*. Assim, unicamente porque os exemplos que se seguirão pressupõem de alguma forma o uso das variáveis *posição* e *momento*,

²⁷ No original: “[...] as referring to conservation theorems of energy and momentum”.

utilizaremos por ora, por motivos de clareza, a “versão de Pauli” como sugere Jammer (1974, p. 102), que intercambia a variável (a) por “*posição*” e (b) por “*momento*”²⁸.

Em simultaneidade, as variáveis (a) e (b) constituem o significado *clássico* do termo *observação* (cf. Bohr, 1983, p. 102). Da forma como descreve Jan Faye (1991, p. 120, ênfase nossa), a relação entre as variáveis (a) e (b), respectivamente identificadas na citação, opera da seguinte maneira *na teoria clássica*:

É possível determinar, através da observação, o movimento de um sistema ao registrar sua trajetória em cada ponto do espaço e em qualquer instante do tempo [(a)]. Mas, quando ocorre a interação com o sistema de observação, deve ser possível determinar o efeito da interação sobre o estado do sistema, sendo possível definir o estado do sistema isolado após a interação. Isto só é possível dado o princípio em que momento e energia são conservados [(b)]. Assim, na teoria clássica, dois modos de descrição são combinados: aquela em que o estado de um sistema se desenvolve continuamente no espaço e no tempo, e aquela na qual a mudança do estado de um sistema, causada pela interação, é determinada pelos princípios de conservação de momento e energia. Disto se segue que ao sistema isolado sempre pode ser atribuído um estado mecânico bem definido, quer o sistema interaja ou não com outro sistema. É de fato esta combinação de uma descrição causal, dada em termos de energia e conservação de momento, com uma descrição em relação a cada ponto do tempo e espaço, que permite a descrição determinista do sistema na teoria clássica, e que nos permite definir qualquer estado futuro de um sistema isolado assim que seu estado inicial for determinado pela observação.²⁹

²⁸ Uma das contribuições de Weizsäcker (1955) para a compreensão do termo “complementaridade” de Bohr fora a distinção entre várias acepções do termo. A versão de Pauli chamada de “*complementaridade paralela*” visto que os conceitos de “*posição*” e “*momento*” pertenceriam à mesma imagem intuitiva dos processos físicos caso se queira definir completamente o estado de um sistema; a versão de Bohr, no entanto, seria chamada de *complementaridade circular* (cf. Jammer, 1974, p. 91).

²⁹ No original: “Through observation it is possible to determine the motion of a system by registering its trajectory in every point of space and at any moment of time. But when there occurs observational interaction with the system it must be possible to determine the effect of the interaction on the state of the system if it is to be possible to define the state of the isolated system subsequent to the interaction. This is only possible given the principle that momentum and energy are conserved. Thus in the classical framework two modes of description are combined: that in which the state of a system develops continuously in space and time, and that in which a change of the state of a system caused by interaction is determined by the principles of conservation of momentum and energy. From this it follows that the isolated system can always be ascribed a well-defined mechanical state irrespective of whether the system interacts with another system or not. It is in fact this combination of a causal description given in terms of energy and momentum conservation with a description with respect to every point of space and time, which in the classical framework yields the deterministic description of the system, and which allows us to define any future state of an isolated system as soon as we have determined its initial state by observation.”

Na teoria quântica, no entanto, em consequência do *postulado quântico*, não seria possível medição *simultânea* das duas variáveis, o que desproveria de sentido os conceitos (a) e (b), de acordo com o critério operacionista assumido. Para tanto, Bohr propõe que tais variáveis componham uma descrição *complementar*, caso tomadas em situações experimentais distintas, *mutuamente exclusivas*, mas, no entanto, *necessárias* para uma descrição exaustiva dos fenômenos quânticos.

Da forma como descrito, o termo “*complementaridade*” de Bohr parece se referir a *modos de descrição* distintos, acompanhados de *arranjos experimentais* distintos, de modo que, segundo Jammer (1974, p. 97, ênfase nossa): “[...] pode ser estendido aos parâmetros ou variáveis elas mesmas em termos de quais descrições complementares são formuladas”³⁰, assim, por exemplo, “uma coordenada de posição e uma variável de momento são chamadas complementares umas às outras”³¹; neste sentido, o termo “*complementaridade*” é “justificado somente se as chamadas variáveis são utilizadas em descrições correspondendo a operações experimentais complementares”³².

São precisamente tais *modos complementares de descrição* que devem ser realizados na *terminologia da linguagem da teoria clássica*, de modo que podemos passar para a análise da primeira premissa (P₁). Isto se daria, a princípio, pela *natureza da observação* que, segundo Bohr (1983 [1928], p. 89) “em última análise, toda observação pode, de fato, ser reduzida às nossas percepções sensoriais”³³. Uma observação de um objeto quântico parece representar a *ampliação* de um sinal *microscópico* (quântico), por uma *agência de medição*, para o nível *macroscópico* (clássico), de tal forma que:

Ao traçar as observações de volta às nossas sensações, novamente deve-se referir o postulado quântico em conexão com a percepção da agência de observação [medição], seja por meio de sua ação direta sobre o olho ou por

³⁰No original: “[...] may be carried over to the parameters or variables themselves in terms of which complementary descriptions are formulated”.

³¹No original: “[...] a position coordinate and a momentum variable are called complementary to each other”.

³²No original: “[...] is justified only if the variables, so-called, are used in descriptions corresponding to complementary experimental arrangements”.

³³No original: “Ultimately, every observation can, of course, be reduced to our sense perceptions.”

meio de auxiliares adequados, tais como chapas fotográficas, nuvens [da câmara de] Wilson, etc.³⁴ (BOHR, 1983 [1928], p.102)

Assim, raciocina Bohr (1983 [1928], p. 126), na medida em que “[...] toda palavra na linguagem se refere a nossa percepção comum”³⁵, e que nossa percepção comum é relativa aos macro-objetos – os objetos da teoria clássica – nossa linguagem deve ser clássica.

Tentamos, até aqui, reconstruir a argumentação de Bohr sobre o termo “complementaridade”. Da forma como proposto por Jammer (1974, p. 101), a reconstrução da premissa P₂ pode ser resumidamente enunciada passo a passo da seguinte maneira:

1. Indivisibilidade do quantum de ação (postulado quântico).
2. Descontinuidade (ou individualidade) dos processos quânticos.
3. Incontrolabilidade da interação entre objeto e instrumento [de medição].
4. Impossibilidade de uma (estrita) descrição espaço-temporal, ao mesmo tempo, causal.
5. Renúncia ao modo clássico de descrição.³⁶

Passemos agora à análise crítica do conceito “complementaridade”. O ponto 5 indicado na conclusão (C₁) pode soar contraditório tendo em vista a necessidade, expressa por Bohr, do uso da *linguagem clássica* para a explicação dos fenômenos quânticos. Nas palavras de Weizsäcker (1971, p. 26), “a física clássica foi substituída pela teoria quântica; a teoria quântica é verificada através de experimentos; os experimentos devem ser descritos em termos da física clássica”³⁷. No entanto, o que caracteriza um *modo clássico de descrição* é a existência de apenas *uma* descrição

³⁴ No original: “In tracing observations back to our sensations, once more regard has to be taken to the quantum postulate in connection with the perception of the agency of observation, be it through its direct action upon the eye or by means of suitable auxiliaries such as photographic plates, Wilson clouds, etc.”

³⁵ No original: “[...] every word in the language refers to our ordinary perception.”

³⁶ No original: “1. Indivisibility of the quantum of action (quantum postulate. 2. Discontinuity (or individuality) of elementary processes. 3. Uncontrollability of the interaction between object and instrument. 4. Impossibility of a (strict) spatiotemporal and, at the same time, causal description. 5. Renunciation of the classical mode of description.”

³⁷ No original: “Classical physics has been superseded by quantum theory; quantum theory is verified by experiments; experiments must be described in terms of classical physics.”

completa. No entendimento de Bohr, tal *único modo* se refere a *uma única descrição, ao mesmo tempo causal e espaço-temporal*. Assim, se for levado em consideração que *uma descrição clássica* jamais fornece uma descrição *completa* de um objeto quântico no sentido da *necessidade* da exclusividade mútua de (ao menos dois) modos clássicos de descrição, a aparência de uma contradição desaparece.

Ainda assim, outra dificuldade para a utilização da terminologia clássica para a descrição dos fenômenos quânticos é exposta por Howard (1994, pp. 201-229), na medida em que os *conceitos clássicos* carregam *pressupostos metafísicos* diferentes ou até mesmo contraditórios em relação àqueles assumidos pela mecânica quântica – da forma como interpretada pela complementaridade. Aqui, mais uma vez, a dificuldade enunciada por Weizsäcker (1971, p. 26) acerca do problema lógico da utilização da linguagem clássica para a descrição dos fenômenos quânticos parece ocorrer. No entanto, o problema se estende para uma ordem metafísica, uma vez que o comprometimento ontológico com a tese de que *os entes possuem uma realidade objetiva independente* é uma característica notável dos *conceitos clássicos*. Em outras palavras, os termos clássicos trazem consigo a ideia de que *os objetos que compõem o mundo existem independentemente de qualquer interação (medição/observação)* – o que parece claramente contradizer o *postulado quântico*, assumido como ponto de partida para a interpretação da complementaridade (cf. Bohr, 1983 [1928], p. 88).

Tal comprometimento ontológico, presente na terminologia clássica, fora chamado por Howard (1985; 1989; 1994, p. 207) de “*princípio da separabilidade*”, que seria uma nomenclatura abreviada de um princípio, atribuído a Einstein, que prevê a “*existência mutuamente independente de coisas espacialmente distantes*”. A assunção da *separabilidade* seria, para Howard (1994, p. 206), necessária para a noção de *independência metafísica* na medida em que só se poderia atribuir uma *realidade física independente*, num sentido *metafísico forte*, aos entes cuja *identidade* é mantida separadamente dos outros. Para Einstein (cf. 1971 [1948], p. 169), a *separabilidade* seria a condição necessária para que *conceitos físicos* ou *leis físicas* fossem formuladas. O físico e filósofo Don Howard (2015) e o matemático, físico e filósofo Décio Krause (cf.

2010, p. 122) vão além e consideram que o realismo einsteiniano *é a própria tese da separabilidade*.

O princípio da separabilidade será tratado mais detalhadamente no capítulo seguinte. Por ora, limitamo-nos a descrever a forma como Bohr (1938, 25-26, ênfase nossa) enuncia tal problemática (bem como sua solução):

A elucidação dos paradoxos da física atômica tem divulgado o fato de que a interação inevitável entre os objetos e os instrumentos de medição define um limite absoluto à possibilidade de falar de um comportamento de objetos atômicos que seja independente dos meios de observação. Estamos aqui diante de um problema epistemológico muito novo na filosofia natural, onde toda a descrição das experiências até agora tem sido baseada na suposição, *já inerente às convenções comuns da linguagem*, de que é possível distinguir claramente entre o comportamento dos objetos e os meios de observação. Esta suposição não é apenas plenamente justificada por toda experiência cotidiana, mas constitui até mesmo toda a base da física clássica. [...] Como nós estamos tratando, porém, com fenômenos como processos atômicos individuais que, devido à sua própria natureza, são essencialmente determinados pela interação entre os objetos em questão e os instrumentos de medição necessários para a definição do arranjo experimental, somos, portanto, obrigados a examinar mais de perto a questão sobre o tipo de conhecimento que pode ser obtido em relação aos objetos. A este respeito, *devemos, por um lado, perceber que o escopo de cada experimento físico – para adquirir conhecimento em condições reprodutíveis e transmissíveis – não nos deixa escolha a não ser usar conceitos cotidianos, talvez refinados pela terminologia da física clássica, não só em todos os relatos de construção e de manipulação dos instrumentos de medição, mas também na descrição dos resultados experimentais reais. Por outro lado, é igualmente importante entender que esta própria circunstância implica que nenhum resultado de um experimento relativo a um fenômeno, que, em princípio, está fora do alcance da física clássica, pode ser interpretado como provedor de informações sobre propriedades independentes dos objetos.*³⁸

³⁸ No original: “The elucidation of the paradoxes of atomic physics has disclosed the fact that the unavoidable interaction between the objects and the measuring instruments sets an absolute limit to the possibility of speaking of a behavior of atomic objects which is independent of the means of observation. We are here faced with an epistemological problem quite new in natural philosophy, where all description of experiences has so far been based upon the assumption, already inherent in ordinary conventions of language, that it is possible to distinguish sharply between the behaviour of objects and the means of observation. This assumption is not only fully justified by all everyday experience but even constitutes the whole basis of classical physics. [...] As soon as we are dealing, however, with phenomena like individual atomic processes which, due to their very nature, are essentially determined by the interaction between the objects in question and the measuring instruments necessary for the definition of the experimental arrangement, we are, therefore, forced to examine more closely the question of what kind of knowledge can be obtained concerning the objects. In this respect we must, on the one hand, realize that the aim of every physical experiment – to gain knowledge under reproducible and communicable conditions – leaves us no choice but to use everyday concepts, perhaps refined by the terminology of classical physics, not only in all accounts of the construction and manipulation of the measuring instruments

A ordem das razões da passagem citada acima é, de acordo com Howard (1994, p. 208), a seguinte: (i) a *separabilidade* deve ser abandonada em se tratando dos fenômenos quânticos; (ii) a assunção da *independência* – que, para Howard (1994, p. 206) pressupõe a *separabilidade* – é inerente ao modo *clássico* de descrição; (iii) para comunicar os *resultados* dos experimentos quânticos, de modo a evitar ambiguidades, a linguagem *clássica* deve ser utilizada; (iv) a linguagem clássica é fundada na assunção da *independência* que a teoria quântica nega. Para Howard (1994, p. 208, ênfase nossa), é o caso que:

A física nos obriga, em princípio, a negar a independência dos observadores e dos objetos quânticos; a filosofia, no pretexto da demanda pela objetividade e, portanto, comunicabilidade inequívoca, nos obriga, em princípio, a reintroduzir a suposição da independência em nossa escolha de uma linguagem descritiva.³⁹

Ao que parece, para Bohr, a utilização dos *conceitos clássicos* é *necessária* para que haja uma *comunicação* dos experimentos quânticos *livre de ambiguidades*. Tal comunicação, de acordo com Howard (1994, p. 207), seria a base para aquilo que Bohr (1963, p. 10-11, ênfase nossa) chama de *objetividade*: uma comunicação *objetiva* é uma comunicação *livre de ambiguidades*:

Nossa tarefa deve ser responder pela experiência de um *modo independente do julgamento subjetivo*, individual, e, por conseguinte, *objetivo na medida em que pode ser inequivocamente comunicada na linguagem humana comum*. [...] [É] decisivo perceber que, por mais que os fenômenos ultrapassem o alcance da experiência comum, a descrição do arranjo experimental e o registro das observações deve ser baseada na linguagem comum.⁴⁰

but also in the description of the actual experimental results. On the other hand, it is equally important to understand that just this circum stance implies that no result of an experiment concerning a phenomenon which, in principle, lies outside the range of classical physics can be interpreted as giving information about independent properties of the objects."

³⁹ No original: "Physics forces us, in principle, to deny the independence of observers and quantum objects; philosophy, in the guise of the demand for objectivity and, thus, unambiguous communicability, compels us, in principle, to reintroduce the assumption of independence in our choice of a descriptive language."

⁴⁰ No original: "Our task must be to account for experience in a manner independent of individual subjective judgment and therefore objective in the sense that it can be unambiguously communicated in the common

De tal linha de raciocínio, segue-se que, para que haja *objetividade* na descrição dos experimentos quânticos, é necessária a assunção da *independência metafísica* tanto do instrumento de medição quanto do objeto quântico – e, por conseguinte, do princípio de *separabilidade* – visto que a linguagem *clássica*, necessária para a descrição objetiva dos fenômenos quânticos é baseada em tais noções filosóficas.

Esta problemática se desdobra, para Faye (1991, pp. 128-129) em dois pontos principais: (i) se o aparelho é clássico, o resultado deve ser clássico e (ii) a descrição é clássica pois a *natureza da noção de observação* é clássica. O ponto (i) é caracterizado pelo seguinte argumento: o aparato escolhido para efetuar uma medição é constituído de um objeto macroscópico, cujo funcionamento é baseado inteiramente em leis clássicas, e os dados empíricos da medição fornecidos por tal aparelho devem ser entendidos de acordo com seu funcionamento, de modo que tais *dados empíricos* só podem ser descritos em termos dos conceitos clássicos. A fragilidade do ponto (i) é justamente sua contingência histórica de modo que aparelhos mais avançados (menores) poderiam vir a descrever “quanticamente” um fenômeno quântico⁴¹.

O ponto (ii), no entanto, parece ser mais fundamental. Para Faye (1991, pp. 127-129), a física clássica desenvolveu métodos para ordenar a experiência humana de uma forma objetiva. No *mundo macroscópico* é aparentemente possível conectar descrições causais com descrições espaço-temporais, da mesma forma que aparentemente é possível distinguir entre um sistema utilizado como instrumento para observação e um sistema a ser observado. Assim, ao que parece, a *natureza da observação* que ordena e estrutura nossa experiência humana cotidiana assim procede, sendo a única garantia de que tal experiência possa vir a ser considerada *objetiva*. É precisamente porque os conceitos clássicos se referem às formas de percepção, sobre

human language. [...] it is decisive to realize that however far the phenomena transcend the range of ordinary experience, the description of the experimental arrangement and the recording of observations must be based on common language.”

⁴¹ Este raciocínio também parece controverso, pois pressupõe que algum dia poderíamos perceber diretamente um aparelho quântico de medição – o que parece esbarrar nas próprias limitações da percepção humana.

as quais nós – enquanto *sujeitos humanos* – apreendemos o *mundo exterior*, que eles são indispensáveis para que a *descrição* de um fenômeno possa ser estruturada e comunicada de forma inteligível.

Da forma como Jan Faye (2008) propõe, a distinção entre sujeito e objeto seria uma *pré-condição* para o conhecimento objetivo, isto é, um conhecimento que não seja dependente da visão do sujeito sobre um determinado objeto – o que seria possível somente em termos de uma descrição espaço-temporal e causal, de acordo com nossa *percepção*. Isto é notável se levarmos em consideração a *redução* de Bohr (1983 [1928], p. 89) *do ato de medição às nossas percepções cotidianas*. Ou ainda, da forma como David Favrholt (1994, p. 80) ilustra a situação, é “[...] porque somos seres macroscópicos, nossa linguagem é necessariamente adaptada ao mundo macroscópico”⁴². Bohr (1963 [1961], p. 78, ênfase nossa) explicita a situação da seguinte maneira:

A exigência de que seja possível comunicar os resultados experimentais, de uma forma inequívoca, implica que o arranjo experimental e os resultados da observação devem ser expressos na linguagem comum adaptada para nossa orientação no ambiente. Assim, a *descrição de fenômenos quânticos exige uma distinção, em princípio, entre os objetos sob investigação e o aparelho de medição, por meio do qual as condições experimentais são definidas*.⁴³

A linguagem clássica seria então *utilizada* pela assunção da *separabilidade* que sua terminologia carrega, e *justificada* pela necessidade da comunicação objetiva dos experimentos quânticos. De acordo com Howard (1994, p. 209, ênfase nossa), não se trataria de uma contingência histórica, passível de ser superada por algum aprimoramento linguístico, mas justamente de uma necessidade metodológica, de modo que:

⁴² No original: “Because we are macroscopic beings, our language is necessarily adapted to the macroscopic world.”

⁴³ No original: “Just the requirement that it be possible to communicate experimental findings in an unambiguous manner implies that the experimental arrangement and the results of the observation must be expressed in the common language adapted to our orientation in the environment. Thus, the description of quantum phenomena requires a distinction in principle between the objects under investigation and the measuring apparatus by means of which the experimental conditions are defined.”

Os conceitos da física clássica facilitam uma descrição inequívoca porque, ao assumir a separabilidade do instrumento e do objeto, eles nos permitem dizer que *este objeto definido possui esta propriedade definida*. Se o instrumento e o objeto não fossem considerados como independentes, não poderíamos justificar que consideramos os resultados das medições como relatos de propriedades intrínsecas do objeto.⁴⁴

Ao que parece, Bohr (1958b, p. 3-4, ênfase nossa) enfatiza a necessidade de que a *agência de medição* seja considerada *clássica* – isto é, fora do alcance do *postulado quântico* (o referido “quantum de ação”) e, portanto, *separado* ou *independente* – no que tange à *comunicabilidade* dos seus resultados:

O novo recurso essencial na análise dos fenômenos quânticos é, no entanto, a introdução de uma *distinção fundamental entre o aparelho de medição e os objetos sob investigação*. Esta é uma consequência direta da necessidade de *considerar as funções dos instrumentos de medição em termos puramente clássicos, excluindo, em princípio, qualquer relação com o quantum de ação* [o postulado quântico].⁴⁵

Isto não significa, no entanto, que a *ontologia da física clássica* deva ser estendida à mecânica quântica como um todo. De acordo com Faye (2008), o postulado quântico mantém a implicação de que as variáveis complementares, ainda que descritas à maneira clássica, só podem ser aplicadas significativamente *em relação a uma operação experimental* e não – como pressupõe a ontologia clássica – *a despeito de qualquer operação experimental*. Isto significa que a complementaridade recusa qualquer descrição utilizada para indicar propriedades *por trás dos fenômenos*, existentes em si mesmos, inerentes e *portadores de uma independência metafísica de qualquer operação experimental*. Assim, a utilização da noção metafísica da *separabilidade*, implícita nos conceitos clássicos para a descrição dos fenômenos

⁴⁴ No original: “Classical physical concepts facilitate an unambiguous description, because, by assuming the separability of instrument and object, they enable us to say that this definite object possesses this definite property. If instrument and object were not regarded as independent, we would not be justified in regarding measurement results as reports about the intrinsic properties of the observed object alone.”

⁴⁵ No original: “The essentially new feature in the analysis of quantum phenomena is, however, the introduction of a fundamental distinction between the measuring apparatus and the objects under investigation. This is a direct consequence of the necessity of accounting for the functions of the measuring instruments in purely classical terms, excluding in principle any regard to the quantum of action.”

quânticos é *limitada*, de modo que não estende a *ontologia* clássica para os objetos quânticos. Da forma como diz Faye (1991, pp. 118, ênfase nossa):

[...] a nova [teoria quântica] e a velha teoria [clássica] devem ser comensuráveis no que diz respeito ao significado empírico. Em outras palavras, a necessidade semântica do uso de analogias implica que as duas teorias correspondentes devem ser empiricamente comparáveis, embora possam ser logicamente incompatíveis. *As duas teorias podem ser baseadas em suposições amplamente divergentes a respeito de determinados aspectos da realidade física e, portanto, as teorias podem envolver diferentes compromissos ontológicos, mas o conteúdo empírico da linguagem na qual estes pressupostos são expressos é o mesmo ou é similar.*⁴⁶

Ao que parece, há aqui em jogo uma noção *semântica* na qual o uso dos conceitos da física clássica são necessários para uma descrição exaustiva (ou seja, *completa*) da realidade física que, de acordo com Faye (2008), implicaria na *restrição do domínio de aplicabilidade dos conceitos clássicos*⁴⁷ e não no seu abandono uma vez que, para que os conceitos clássicos possam ser aplicados à descrição quântica, o *significado* de tais conceitos clássicos devem ser compatíveis com a teoria quântica. Bohr (1934, p. 8) chama este princípio *metodológico* de *princípio da correspondência*, cuja formulação é enunciada da seguinte maneira:

A necessidade de fazer um uso extensivo [...] dos conceitos clássicos, sobre a qual a interpretação de toda a experiência em última análise depende, deu origem à formulação do chamado princípio de correspondência, que expressa nossos esforços de utilizar todos os conceitos clássicos ao atribuir-lhes uma re-interpretação teórico-quântica adequada.⁴⁸

⁴⁶ No original: “[...] *the old and the new theory must be commensurable with respect to empirical meaning. In other words, the semantical requirements of using analogies imply that two corresponding theories have to be empirically comparable even though they may be logically incompatible. The two theories may be based on widely differing assumptions regarding certain aspects of physical reality, and hence the theories may involve different ontological commitments, but the empirical content of the language in which these assumptions are expressed is the same or similar.*”

⁴⁷ Esta passagem parece sugerir que Bohr contrastaria com a posição historicista da ciência que, da forma como propuseram filósofos como Thomas Kuhn e Paul Feyerabend, a teoria quântica seria uma *superação* da mecânica clássica de modo que as duas teorias seriam *incomensuráveis*, isto é, totalmente incompatíveis.

⁴⁸ No original: “*The necessity of making an extensive use [...] of the classical concepts, upon which depends ultimately the interpretation of all experience, gave rise to the formulation of the so-called correspondence*

A *visão comum* sobre a interpretação da complementaridade seria, de acordo com Howard (1994, p. 211), a de relegar às *agências de medição* um comportamento *inteiramente clássico*, isto é, considerar que as agências de medição (frequentemente um *aparelho*) são um objeto macroscópico e, portanto, para *todos os efeitos*, clássico, da forma como sugere o próprio Bohr (1958b, p. 3, ênfase nossa):

Em arranjos experimentais reais, o cumprimento de tais exigências [de uma descrição inequívoca do aparelho e dos resultados da medição] é assegurada pelo uso, como aparelho medidor, de corpos rígidos suficientemente pesados que permitam uma descrição totalmente clássica das relativas posições e velocidades.⁴⁹

Tal interpretação comum, que concebe o *aparelho de medição* como *inteiramente clássico*, é chamada por Howard (1994, p. 210) de “*interpretação coincidente*”⁵⁰ e afirma que a divisão clássica/quântica *coincide* com a divisão aparelho medidor/objeto medido. Nela, o *critério* para delinear os limites do *mundo* clássico para o *mundo* quântico seria o “*tamanho*” do aparelho medidor⁵¹ que, por se tratar de um objeto macroscópico, deveria pertencer ao *mundo clássico*.

principle which expresses our endeavors to utilize all the classical concepts by giving them a suitable quantum-theoretical re-interpretation.”

⁴⁹ No original: “*In actual experimental arrangements, the fulfillment of such requirements is secured by the use, as measuring instruments, of rigid bodies sufficiently heavy to allow a completely classical account of their relative positions and velocities.*”

⁵⁰ No original: “*coincidence interpretation*”.

⁵¹ De fato, o argumento do “*tamanho*” do objeto de medição é apenas *uma* das características daquilo que Howard (1994, p. 210) chama de “*interpretação coincidente*”. Outra característica, igualmente importante, seria a *irreversibilidade* dos efeitos ampliados pelos instrumentos medidores. A citação de Bohr (1958b, p. 3) acima continua da seguinte forma: “*In this connection, it is also essential to remember that all unambiguous information concerning atomic objects is derived from the permanent marks - such as a spot on a photographic plate, caused by the impact of an electron - left on the bodies which define the experimental conditions. Far from involving any special intricacy, the irreversible amplification effects on which the recording of the presence of atomic objects rests rather remind us of the essential irreversibility inherent in the very concept of observation. The description of atomic phenomena has in these respects a perfectly objective character, in the sense that no explicit reference is made to any individual observer and that therefore [...] no ambiguity is involved in the communication of information*”. Uma das características dos objetos quânticos é sua *reversibilidade* no tempo – uma propriedade que não é observada nos macro-corpos. Nos últimos, a característica observada é sua *irreversibilidade*, ou seja, a *duração* ou *permanência* dos efeitos nos objetos. No entanto, optaremos por apresentar o argumento de Howard (1994) frente à chamada

A *interpretação coincidente* desencadearia, no entanto, uma série de problemas filosóficos como, por exemplo, a introdução de um *dualismo* na ontologia do processo de medição na medida em que os objetos contidos na *ontologia clássica* (no caso, os aparelhos medidores) devem interagir fisicamente com os objetos contidos na *ontologia quântica* (no caso, os objetos quânticos) ao passo que pertençam a teorias físicas fundamentalmente diferentes (cf. Howard, 1994, p. 211). Uma séria inconsistência, relacionada indiretamente à problemática da *interpretação coincidente*, seria, de acordo com Jammer (1974, p. 98), a *descontinuidade* introduzida na teoria pelo postulado quântico da forma como Bohr (1983 [1928], p. 103, ênfase nossa) enuncia na seguinte passagem:

De acordo com a teoria quântica, a impossibilidade de ignorar a interação com o mecanismo de medição significa que cada observação introduz um novo elemento incontrolável. Na verdade, isto decorre das considerações expostas que a medição das coordenadas de posição de uma partícula é acompanhada não só por uma mudança finita nas variáveis dinâmicas, mas também a fixação de sua posição significa uma *ruptura* completa na descrição causal de seu comportamento dinâmico, enquanto que a determinação de seu momento implica sempre em uma *lacuna* no conhecimento de sua propagação espacial. Esta situação realça de forma notável o caráter complementar da descrição dos fenômenos atômicos, que surge como uma consequência inevitável da oposição entre o postulado quântico e a distinção entre o objeto e a agência de medição, inerente à nossa própria idéia de observação.⁵²

De acordo com Jammer (1974, p. 98), tal *ruptura* ou *lacuna* seria a mais séria dificuldade filosófica da posição de Bohr. Tal dificuldade é agravada da forma como

interpretação coincidente da complementaridade de Bohr apenas com o primeiro aspecto, do “tamanho” do aparelho medidor pelas consequências filosóficas que tal argumento desencadeará nos capítulos seguintes no que tange o problema do *macro-realismo* ou *macro-objetivismo* (cf. d’Espagnat, 1999, pp. 235-237). O aspecto da *irreversibilidade* da medição será abordado no terceiro capítulo.

⁵² No original: “According to the quantum theory, just the impossibility of neglecting the interaction with the agency of measurement means that every observation introduces a new uncontrollable element. Indeed, it follows from the above considerations that the measurement of the positional co-ordinates of a particle is accompanied not only by a finite change in the dynamical variables, but also the fixation of its position means a complete rupture in the causal description of its dynamical behavior, while the determination of its momentum always implies a gap in the knowledge of its spatial propagation. Just this situation brings out most strikingly the complementary character of the description of atomic phenomena which appears as an inevitable consequence of the contrast between the quantum postulate and the distinction between object and agency of measurement, inherent in our very idea of observation.”

Bohr (1934, p. 11, ênfase nossa) enuncia em outro momento: “a magnitude do distúrbio causado pela medição é *sempre* desconhecida”⁵³. Da forma como enunciada, a descontinuidade implícita no processo de medição, de acordo com Jammer (1974, p. 99, ênfase nossa) “não seria considerada como o resultado da troca de uma descrição para seu modo complementar, mas como o resultado de *uma propriedade física operacional*”⁵⁴. A situação se torna ainda mais problemática caso levarmos em consideração a afirmação, de cunho essencialmente ontológico, de Bohr que não se deve atribuir uma “realidade independente” (cf. Bohr, 1983 [1928], p. 89) aos objetos quânticos *fora do seu contexto operacional*. Esta dificuldade dá margem ao famoso *problema da medição quântica*.

O problema da medição será analisado em detalhe nos capítulos seguintes, e é a inconsistência mais séria daquilo que se entende por *interpretação de Copenhague*. Deixaremos a análise e discussão desta problemática para os capítulos seguintes. Por ora, nos ateremos ao delineamento dos termos que serão utilizados para a discussão subsequente acerca de tal problema.

Pelo que foi considerado aqui, parece seguro delinear uma definição para o termo *complementaridade* de acordo com a seguinte notação de Jammer (1974, p. 104):

Uma determinada teoria T admite uma interpretação de complementaridade se as seguintes condições forem satisfeitas: (1) T contém (ao menos) duas descrições D_1 e D_2 , de seu conteúdo; (2) D_1 e D_2 , referem-se ao mesmo universo de discurso U (no caso de Bohr, a microfísica); (3) nem D_1 nem D_2 , se tomados individualmente, respondem exhaustivamente todos os fenômenos de U; (4) D_1 e D_2 são mutuamente exclusivos, no sentido de que a sua combinação numa única descrição engendraria em contradições lógicas.⁵⁵

⁵³ No original: “[...] *the magnitude of the disturbance caused by a measurement is always unknown*”.

⁵⁴ No original: “[...] *is not regarded as a result of switching from one picture to its complementary mode but as the outcome of an operational physical feature*.”

⁵⁵ No original: “*A given theory T admits a complementarity interpretation if the following conditions are satisfied: (1) T contains (at least) two descriptions D_1 and D_2 , of its substance-matter; (2) D_1 and D_2 , refer to the same universe of discourse U (in Bohr’s case, microphysics); (3) neither D_1 nor D_2 if taken alone, accounts exhaustively for all phenomena of U; (4) D_1 and D_2 , are mutually exclusive in the sense that their combination into a single description would lead to logical contradictions.*”

Os pontos (1) a (3) são equivalentes a uma descrição sucinta daquilo que foi exposto até aqui. O ponto (4), no entanto, merece atenção especial uma vez que dele emerge um problema de ordem *lógica*. O termo complementaridade se refere também à *incompatibilidade* dos modos clássicos de descrição quando há a tentativa de que sua *combinação* leve a *um único* modo de descrição para os fenômenos quânticos. No entanto, como notam da Costa e Krause (2006, p. 107, ênfase nossa), em *lógica clássica*, a *conjunção de duas fórmulas verdadeiras é também uma fórmula válida*, de modo que se D_1 e D_2 (no caso da *complementaridade* aplicada à teoria quântica, correspondendo respectivamente às descrições *ondulatórias* e *corpúsculares* dos objetos quânticos) são formas válidas. Sendo assim, sua *combinação* também deveria ser válida:

[...] se α e β são as duas teses ou teoremas de uma teoria (fundada na lógica clássica), então $\alpha \wedge \beta$ também é uma tese (ou um teorema) dessa teoria. Isto é o que entendemos intuitivamente quando dizemos que, com *base na lógica clássica*, uma proposição 'verdadeira' não pode 'excluir' outra proposição 'verdadeira'. [...] Isso corresponde ao fato de que, em lógica clássica, se α é consequência de um conjunto de afirmações Δ e β é também uma consequência de Δ , então $\alpha \wedge \beta$ (α e β) é também uma consequência do Δ . Se β é a negação de α (ou vice-versa), então esta regra implica que a partir do conjunto de fórmulas Δ deduzimos uma contradição $\alpha \wedge \neg \alpha$ (ou $\neg \beta \wedge \beta$). Além disso, quando α e β são *incompatíveis em algum sentido*, $\alpha \wedge \beta$ constitui uma impossibilidade.⁵⁶

Isto indica que a noção de *complementaridade* formulada por Bohr poderia encontrar dificuldades caso se utilize da *lógica clássica* como sua *linguagem subjacente* visto que, da forma como enunciado, o conceito levaria a uma *contradição* – o que tornaria o conceito *inconsistente*. Para da Costa e Krause (2006, p. 112), talvez a única solução para tal problema seria a *modificação da lógica subjacente na linguagem da complementaridade* para um sistema no qual uma *contradição estrita* (tal como $\gamma \wedge \neg \gamma$)

⁵⁶ No original: “[...] if α and β are both theses or theorems of a theory (founded on classical logic), then $\alpha \wedge \beta$ is also a thesis (or a theorem) of that theory. This is what we intuitively mean when we say that, on the grounds of classical logic, a ‘true’ proposition cannot ‘exclude’ another ‘true’ proposition. [...] This corresponds to the fact that, in classical logic, if α is a consequence of a set Δ of statements and β is also a consequence of Δ , then $\alpha \wedge \beta$ (α and β) is also a consequence of Δ . If β is the negation of α (or vice-versa), then this rule implies that from the set of formulas Δ we deduce a contradiction $\alpha \wedge \neg \alpha$ (or $\neg \beta \wedge \beta$). In addition, when α and β are in some sense incompatible, $\alpha \wedge \beta$ constitutes an impossibility.”

não seria deduzida dos pares complementares, ou seja, da fórmula $\alpha \wedge \beta$ (sob as condições expostas acima, respectivamente correspondentes às variáveis D_1 e D_2)⁵⁷.

A despeito de todas as dificuldades que, como vimos, a interpretação da *complementaridade* apresenta, procuramos até aqui precisar uma definição desse conceito para que possamos discutir adiante o problema da medição. No entanto, tal *definição* não terá precisão arbitrariamente grande na medida em que (1) o próprio Bohr não delineou uma definição precisa (cf. Jammer, 1974, p. 95; Faye, 1991, p. 142) e (2) nem mesmo os *comentadores* têm consenso sobre a *complementaridade* de Bohr (cf. Faye e Folse, 1994), de modo que *é possível* interpretá-la desde uma semântica *anti-realista* (cf. Faye, 1991) até uma semântica *realista* (cf. Folse, 1985, 1994). A discussão acerca do último ponto será realizada no próximo capítulo sob a ótica do posicionamento de Bohr acerca das críticas de *incompletude* de sua interpretação. Sobre o primeiro ponto, talvez o mais próximo de uma definição (cf. Jammer, 1974, p. 95; Faye, 1991, p. 142; Camilleri, 2007, p. 523) que Bohr (1934, p. 10) chega é a seguinte:

[o postulado quântico] nos obriga a adotar um novo modo de descrição descrita como complementar, no sentido em que qualquer aplicação de conceitos clássicos torne impossível a utilização simultânea de outros conceitos clássicos, que em uma conexão diferente são igualmente necessários para a elucidação dos fenômenos.⁵⁸

Assim, para que possamos prosseguir com a discussão, adotaremos, por ora, para fins práticos, essa *definição* (ainda que incompleta) que Bohr oferece sobre a *complementaridade*: sempre que nos referirmos ao conceito neste trabalho, temos em mente *essa* definição.

⁵⁷ Para uma breve formulação de uma lógica desse tipo, ver da Costa e Krause (2006, pp. 112-116). Não nos comprometemos aqui com um sistema lógico em particular, nos limitaremos com a exposição dos problemas que surgem ao utilizar o raciocínio clássico (lógico e físico) para a mecânica quântica. A discussão em torno deste ponto se estenderá nos capítulos seguintes.

⁵⁸ No original: “[...] forces us to adopt a new mode of description designated as complementary in the sense that any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts, which in a different connection are equally necessary for the elucidation of phenomena.”

1.3 Heisenberg e Bohr

Com o arcabouço conceitual exposto até então, é oportuno discutir as diferenças filosóficas dos ditos *principais autores* (cf. Farias, 1987, p. 28) daquilo que se entende por interpretação de Copenhague. Ainda que uma análise exaustiva acerca do debate filosófico entre os dois autores esteja fora do escopo deste trabalho, apontaremos algumas considerações notáveis sobre determinados aspectos de suas divergências.

Um dos pontos essenciais dentre as (diversas) diferenças filosóficas entre Heisenberg e Bohr seria, para Camilleri (2007, p. 521), o fato de que, por um lado, Heisenberg enfatiza a necessidade do entendimento do significado do formalismo da teoria quântica enquanto, por outro lado, Bohr enfatiza a necessidade de uma descrição completa dos fenômenos quânticos, ou seja, no entendimento das condições experimentais. Assim, como uma forma preliminar, podemos discutir a diferença entre Heisenberg e Bohr acerca da delimitação dos limites da *teoria* e da *interpretação* da mecânica quântica.

Para Heisenberg, o formalismo matemático da teoria deveria ser suficientemente elaborado para que pudesse dar cabo de uma descrição exaustiva dos fenômenos, pois sua concepção era a de que não existiria algo que não pudesse ser expresso de acordo com uma formulação matemática (cf. Kuhn, 1963, sec. XVIII) – o que, como aponta Heisenberg (1967, p. 98, ênfase nossa), não seria o caso para Bohr:

[...] a clareza matemática não tinha em si qualquer virtude para Bohr. Ele temia que a estrutura matemática formal fosse obscurecer o núcleo físico do problema, e, em qualquer caso, ele estava convencido de que *uma explicação física completa deve absolutamente preceder a formulação matemática*.⁵⁹

⁵⁹ No original: “[Bohr’s] insight into the structure of the theory was not a result of mathematical analysis of the basic assumptions, but rather of intense occupation with the actual phenomena, such that it was possible for him to sense the relationship intuitively, rather than derive them formally [...] Bohr was primarily a philosopher, not a physicist [...] I noticed that mathematical clarity had in itself no virtue for Bohr. He feared that the formal

De acordo com Pauli (apud Jammer, 1974, p. 67), tal controvérsia se daria somente no plano da ordenação ou “precedência” dos conceitos. A discussão acerca da importância e do alcance, tanto do *formalismo* quanto da *interpretação* da teoria quântica, não seria, de acordo com Jammer (1974, p. 67), o aspecto central do debate entre Bohr e Heisenberg em relação à interpretação das relações de indeterminação.

A chave de leitura para a compreensão deste debate seria, para Jammer (1974, p. 68-69), a diferença no *ponto de partida* escolhido por cada autor: ao passo que Heisenberg partiria do *formalismo*, o ponto de partida da interpretação de Bohr acerca das *relações* seria, de acordo com Jammer (1974, p. 66-69), a dualidade onda-partícula – isto é, a impossibilidade de reduzir a descrição dos objetos quânticos aos aspectos exclusivamente corpusculares ou ondulatórios, visto que ambas as formas são encontradas nos experimentos quânticos. Bohr haveria encontrado indicações de que o argumento de Heisenberg conectaria descrições de *partículas* com descrições de *ondas*, que, assim, “pressupõem implicitamente a dualidade onda-partícula”. De fato, como enfatiza Chibeni (2005, p. 15), o experimento mental do microscópio de raios gama pressupõe uma ontologia de partículas enquanto utiliza, ao mesmo tempo, conceitos ondulatórios (como uma *função de onda*) para a representação matemática dos objetos quânticos⁶⁰ (cf. Chibeni 2005, p. 4). Ainda que a dualidade onda-partícula seja um aspecto central da mecânica quântica, optamos por não abordá-lo neste trabalho visto que esta problemática recai na questão sobre a *linguagem* a ser utilizada para uma descrição dos fenômenos quânticos. Assim,

mathematical structure would obscure the physical core of the problem, and in any case he was convinced that a complete physical explanation should absolutely precede the mathematical formulation.”

⁶⁰ Outro argumento, apresentado em Jammer (1974, p. 69), seria o de que, originalmente, quaisquer derivações das relações de Heisenberg a partir dos experimentos mentais (como o do *microscópio de raios gama*) *precisaria* utilizar as equações de Einstein-de Broglie, que conectam descrições da física de partículas com a física ondulatória. No entanto, consideramos que os argumentos anteriores, sem a necessidade de adentrar numa discussão acerca do formalismo da teoria quântica, são suficientes para expor o ponto de vista de Bohr.

A concepção de Heisenberg da indeterminação como uma limitação da aplicabilidade de noções clássicas, como posição ou momento, aos fenômenos microfísicos, não coaduna com a visão de Bohr, segundo a qual elas seriam uma indicação, não da inaplicabilidade da linguagem da física de partículas ou da linguagem da física ondulatória, mas da impossibilidade de utilização de ambos os modos de expressão simultaneamente, apesar do fato de que apenas a sua utilização conjunta forneceria uma descrição completa dos fenômenos físicos.⁶¹ (JAMMER, 1974, pp. 65-66)

Heisenberg e Bohr concordavam, de acordo com Jammer (cf. 1974, p. 97), no fato de que a interpretação da teoria quântica deveria utilizar a terminologia da física clássica. No entanto, ao passo que Heisenberg afirmava a *insuficiência* dos termos da física de *ondas* ou da física de *partículas* para uma explicação completa dos fenômenos quânticos – insuficiência esta expressa nas próprias relações de indeterminação –, Bohr afirmava a *necessidade* do uso de *ambas as teorias*. Para Bohr, no entanto, o significado do termo *explicação* deveria ser revisado.

Em seu sentido *clássico*, uma explicação seria *um modo único*, suficiente, para o esgotamento da descrição de um objeto. Segundo Bohr (1934, pp. 15-16), esta acepção do termo seria empregada por Heisenberg (cf. Kuhn, 1963, sec. XVIII) ao afirmar que *um* esquema matemático seria mais adequado para a explicação dos fenômenos quânticos do que uma ressignificação dos conceitos clássicos (quer sejam da física de partículas ou da física ondulatória) já utilizados para a descrição dos objetos quânticos. Contrariamente, Bohr (1934, p. 96, ênfase nossa) define uma *nova* acepção do termo *explicação* afirmando que “devemos, em geral, estar preparados para aceitar o fato de que uma elucidação completa do mesmo e único objeto pode requerer *diversos pontos de vista que desafiam uma descrição única*”⁶², onde os “diversos pontos de vista” seriam os aspectos complementares da descrição quântica.

⁶¹ No original: “Heisenberg’s conception of indeterminacy as a limitation of the applicability of classical notions, like position or momentum, to microphysical phenomena, did not tally with Bohr’s view according to which they were an indication, not of the inapplicability of either the language of particulate physics or the language of ondulatory physics, but rather of the impossibility of using both modes of expression simultaneously in spite of the fact that only their combined use provides a full description of physical phenomena.”

⁶² No original: “We must, in general, be prepared to accept the fact that a complete elucidation of one and the same object may require diverse points of view which defy a unique description”.

A questão do distúrbio *descontínuo* do ato da medição seria uma indicação da impossibilidade de *definição simultânea* das propriedades observáveis de um objeto quântico, ou seja, de *um modo único de explicação* para os fenômenos quânticos. Dito de outra forma, o indeterminismo expresso pelas relações de Heisenberg, para Bohr, seria um exemplo matemático da *ruptura* ou *descontinuidade* própria do ato de medição, o que obrigaria a formulação de *pontos de vista diversos*, complementares, para uma descrição exaustiva do objeto quântico – a linguagem de tal descrição deve permanecer, de acordo com a operação experimental (complementar) em questão, na *terminologia clássica* (cf. Jammer, 1974, p. 98) –, sendo a *indeterminação* expressa pelas relações de Heisenberg o preço a se pagar caso haja a tentativa de aplicação simultânea dos termos clássicos mutuamente exclusivos (cf. Jammer, 1974, p. 101).

Ao que parece, a *descontinuidade* implícita nos processos de medição é um fator chave para que possamos delinear algumas das divergências filosóficas fundamentais entre Heisenberg e Bohr.

Enquanto para Heisenberg tal descontinuidade seria expressa através de uma formulação matemática, sob a nomenclatura de “redução do pacote de onda” (cf. Jammer, 1974, p. 98), para Bohr, a situação seria totalmente diferente. Da forma como argumenta Faye (2008), na medida em que Bohr não considera que o formalismo matemático da teoria quântica tenha um significado *por si* – ou seja, considera que o formalismo precisa ser *interpretado* – ou mesmo que represente algo *real* no sentido físico do termo, o problema implicado pela chamada *redução do pacote de onda* não seria um problema *caso fosse* uma noção limitada ao formalismo em si mesmo⁶³.

De acordo com Camilleri (2007, p. 522), esta diferença da precedência do formalismo matemático implica maneiras diferentes de visualizar o próprio problema da descontinuidade referido acima (o que ela chama de “o paradoxo

⁶³ Talvez este seja o motivo pelo qual Henry Folse (cf. 1985; 1994) considere Bohr um *anti-realista* quando se diz respeito às *teorias*, isto é, ao formalismo, e um *realista* no que tange às *entidades empíricas* na medida em que considera um objeto quântico uma entidade *real* (quando observada). Assim, o *problema da medição* (cuja contrapartida no *formalismo* seria a própria noção de *redução do pacote de ondas*, na terminologia de Heisenberg) parece ainda se aplicar na interpretação de Bohr, visto que a *ruptura* (Bohr, 1983, p. 103) implícita no *ato* de medição é algo que se mantém.

implícito da mecânica quântica”⁶⁴). Pois, se Heisenberg define um sistema quântico nos termos de uma fórmula matemática, como uma *função de onda*, esta definição *independe da experimentação*. Ainda que não se possa atribuir *realidade física* à função de onda (pelo princípio de medição=criação), esta representação seria aplicável para a descrição de um objeto quântico em termos de *propensidades* ou *possibilidades*⁶⁵. Por outro lado, a definição de um sistema quântico independente de sua relação com um contexto operacional não teria significado na semântica de Bohr, que busca na própria experimentação as condições de possibilidade de definição dos objetos quânticos.

Assim ao passo em que, para Heisenberg, a *descontinuidade* é fruto de um *distúrbio interacional* entre a agência de medição e o objeto quântico medido, Bohr enfatiza que tal descontinuidade seria uma limitação na *definibilidade*, e não de um *distúrbio físico* (Bohr, 1934, pp. 57-63).

Ainda assim, a tese de que ocorre um *distúrbio físico* aparece dentre as teses principais da interpretação de Copenhague. Pessoa Junior (2003, pp. 97-98) elenca, em dez tópicos, as principais teses atribuídas àquilo que se chama de “interpretação ortodoxa”, dos quais sublinharemos apenas um: o *distúrbio interacional*, que afirma que há uma *interação física* entre o *objeto* observado e a *agência de medição* que observa tal objeto.

Este ponto é uma das vias para se chegar ao *problema da medição*, motivo pelo qual a interpretação de Copenhague foi duramente criticada nos anos 30, sob a acusação de *incompletude*. No capítulo seguinte, analisaremos os debates sobre a completude da mecânica quântica, enfatizando o comprometimento ontológico dos pontos de vista de Einstein e Bohr em relação ao *distúrbio interacional* e ao *problema da medição*.

⁶⁴ No original: “[...] *the underlying paradox of quantum mechanics*”.

⁶⁵ Heisenberg (1958, p. 53) enfatiza que esta *realidade* se daria num plano *potencial* – em contraste ao plano *atual* dos fenômenos empíricos –, remontando ao pensamento aristotélico de *potência e ato* (cf. d’Espagnat, 1999, pp. 257-258; Heisenberg, 1958, pp. 147-148)

Procuramos, neste primeiro capítulo, esboçar alguns pontos centrais da interpretação de Copenhague, bem como seus aspectos filosoficamente problemáticos. Deve ficar claro que de modo algum buscamos aqui uma descrição exaustiva dos conceitos de *indeterminação* e *complementaridade*, mas meramente uma definição para possibilitar a discussão nos capítulos seguintes. Na realidade, uma descrição completa de tais conceitos – especialmente a noção de *complementaridade* – não é uma tarefa fácil: conforme aponta Jammer (1974, p. 88) nem mesmo os interlocutores contemporâneos a Bohr foram capazes de compreender completamente sua interpretação da teoria quântica. Como procuramos evidenciar ao longo deste capítulo, grande parte de tal deficiência se dá pelo fato de que Bohr jamais teria oferecido uma descrição formal para a noção de medição, apesar de ser uma noção tão central em suas ideias.

Com o que foi exposto até aqui, poderemos entender melhor alguns aspectos filosóficos nos fundamentos da mecânica quântica, especificamente do conceito de medição. Destacamos como a interpretação de Copenhague oferece uma visão de mundo bastante *contra-intuitiva* em relação à nossa percepção ordinária da realidade à nossa volta, principalmente no que diz respeito à suposição – ou até mesmo à *certeza* – metafísica da existência independente dos objetos que compõem o mundo à nossa volta e do determinismo causal implícito na linearidade dos eventos que experienciamos cotidianamente. No próximo capítulo, analisaremos em detalhes o debate entre Einstein e Bohr, que suscitou diversas questões filosóficas dentro da problemática da medição.

2. ONTOLOGIA E INTERPRETAÇÃO DA MECÂNICA QUÂNTICA

Neste capítulo, analisaremos um dos debates filosóficos centrais no que se refere às questões de princípios ou fundamentos da mecânica quântica, especificamente em relação ao debate entre Albert Einstein e Niels Bohr. Enfatizamos que as pressuposições metafísicas de ambos os autores, que se mostrarão claras ao longo do debate aqui proposto, são fundamentais para a compreensão de tal debate; da mesma forma, são fundamentais para compreender o momento em que se insere o *problema da medição quântica*, que será discutido em detalhes no próximo capítulo.

Para tanto, devemos caracterizar os termos utilizados aqui. Em primeiro lugar, procuramos destacar de que modo uma questão concernente à interpretação da mecânica quântica se insere na problemática filosófica. Em seguida, buscamos uma definição para o termo “ontologia” que utilizaremos ao longo do texto, o que nos permitirá adentrar nos aspectos metafísicos do debate entre Bohr e Einstein, a fim de especificar os pressupostos ontológicos por detrás da argumentação de cada autor. Assim, poderemos delinear a questão da medição quântica como um debate essencialmente filosófico.

2.1 *Um problema filosófico*

Segundo o físico Werner Heisenberg (2004 [1958], p. 10):

A física moderna e, em especial, a teoria quântica [...] levantou uma série de questões muito gerais, concernentes não só a problemas estritamente físicos, como também relacionados ao método das ciências naturais exatas e à natureza da matéria. Tais questões levaram os físicos a reconsiderar os problemas filosóficos que pareciam estar definitivamente resolvidos no estreito quadro da física clássica.

Com o advento da mecânica quântica, principalmente no final dos anos 20, muitos físicos da época se questionaram acerca dos fundamentos das noções de

realidade – noções estas formadas no modelo da física clássica⁶⁶ –, instigando debates acerca das implicações ontológicas da mecânica quântica.

Para compreendermos a questão que emerge das discussões aqui propostas, assumiremos a distinção utilizada pelo físico e filósofo James Cushing (1994, p. 9, ênfase nossa) entre “*formalismo*” e “*interpretação*”, segundo a qual:

[...] formalismo significa uma série de regras de cálculo para fazer previsões que podem ser comparadas com experimentos. [...] *A interpretação física se refere ao que a teoria nos diz sobre a estrutura subjacente do fenômeno em questão (i.e., a história correspondente ao mobiliário do mundo – uma ontologia)*⁶⁷.

Deste modo, assumiremos que o debate em relação à *interpretação* do formalismo da teoria quântica se trata de um debate filosófico, essencialmente metafísico, e especificamente ontológico na medida em que lida com as entidades que compõem o mundo – entidades essas dadas pela teoria, isto é, pelo debate teórico (científico)⁶⁸. Portanto, os dois *momentos* do debate acerca da mecânica

⁶⁶ A noção de “crise” apresentada na obra do físico e filósofo Thomas S. Kuhn (1998, p. 119-120) parece refletir a problemática que surge com o advento da teoria quântica no século XX: “É sobretudo nos períodos de crises reconhecidas que os cientistas se voltam para a análise filosófica como um meio para resolver as charadas de sua área de estudos [...]. Não é por acaso que a emergência da física newtoniana no século XVII e da Relatividade e da Mecânica Quântica no século XX foram precedidas e acompanhadas por análises filosóficas fundamentais da tradição de pesquisa contemporânea”. A revisão paradigmática que a mecânica quântica propõe no terreno da física pode ser abordada por diversos aspectos. Limitamo-nos, aqui, a discutir aquilo que, na teoria kuhniana, constitui as diferenças “substanciais”, ou seja, as diferenças ontológicas num sentido de diferentes “mobiliários do mundo”, como propõe Cushing (cf. 1994, p. 10). Segundo o filósofo revisionista da teoria kuhniana John Preston (2008, p. 56, ênfase nossa): “*Paradigmas sucessivos diferem em diversos aspectos. O primeiro e mais óbvio, que Kuhn chama de diferenças ‘substanciais’, é que eles dizem coisas diferentes acerca da população do universo. Eles envolvem diferentes ontologias, por exemplo, diferentes listas dos tipos de objetos que o mundo contém [...]*”; no original: “*Successive paradigms differ in several ways. The first and most obvious, which Kuhn calls ‘substantive’ differences, is that they tell us different things about the population of the universe. They involve different ontologies, for example, different lists of the kinds of objects the world contains [...]*”. Nesse sentido, referimos a problemática de visualizar a *mecânica quântica* sob a ótica da *física clássica* como *ontológica*.

⁶⁷ No original: “[...] *formalism means a set of equations and a set of calculational rules for making predictions that can be compared with experiment. [...] The physical interpretation refers to what the theory tells us about the underlying structure of these phenomena (i.e., the corresponding story about the furniture of the world – an ontology)*”.

⁶⁸ Uma discussão mais aprofundada sobre esse assunto pode ser encontrada em Bunge (cf. 1977, pp. 1-25).

quântica (filosófico e científico) configurem instâncias diversas por mais que estejam intrinsecamente conectados entre si.

Ainda assim, deve ficar claro que nossa discussão se limitará, neste estudo, aos aspectos filosóficos, especificamente *ontológicos* do debate. Para nos referirmos ao debate ontológico de uma teoria física, é preciso antes categorizar o termo “ontologia”. Procuraremos delinear brevemente uma definição para esse termo, que usaremos ao longo deste estudo, na subseção seguinte.

2.2 *Ontologia ou ontologias?*

O filósofo Thomas Hofweber (2014) elencou, dentre os principais usos na história da filosofia, quatro principais sentidos ou acepções do termo “ontologia”, dos quais selecionaremos, para o propósito da discussão, apenas dois. São eles: o *estudo acerca do que há*, que chamaremos de O1 e o *estudo do comprometimento ontológico*⁶⁹, que chamaremos de O2.

De acordo com Krause (cf. 2006, p. 36), o sentido O1 é comumente chamado *sentido tradicional* do termo “ontologia”: “[...] admite-se, pelo menos desde Aristóteles, que há uma *filosofia primeira* ou *metafísica*, cuja parte central seria a *ontologia*, o estudo daquilo que há”. Parece que o sentido O1 do termo “ontologia”, quando se refere ao estudo *daquilo que há*, carrega a pressuposição de que haja *uma única ontologia* que visa à *descrição correta daquilo que há*. Ou seja, é um sentido que se pretende *universal e a priori*.

Diferentemente, ao mencionar o sentido O2⁷⁰, tem-se implícito, principalmente, o pensamento do filósofo Willard V. O. Quine (1966), segundo quem nos comprometemos com a existência de entidades através da linguagem que

⁶⁹ Modificamos a abreviação do termo “ontology” utilizada por Hofweber (2014) por motivos de clareza.

⁷⁰ Esta acepção do termo “ontologia” é comumente chamada de “sentido naturalizado” (cf. Arenhart, Krause, 2012, p. 47, 52). No entanto, o termo “naturalismo” é frequentemente associado com o *fisicalismo* (cf. Papineau, 2009) – uma tese com a qual não nos comprometemos quando utilizamos o termo “O2”.

utilizamos para descrever as teorias científicas, comprometimento este que se torna explícito quando as sentenças são traduzidas em linguagem formal (cf. Quine, 1953, p. 13).

Conforme o filósofo Bertrand Russell (1905), expressões como “o rei da França” envolvem quantificação existencial no sentido de que está implícito na frase que “*existe* uma pessoa e precisamente esta pessoa ocupa o cargo de rei da França”. Como observou Davidson (1980 [1967]), até mesmo sentenças de ação pressupõem o quantificador existencial (\exists); assim, se o termo “ontologia” for entendido no sentido O2, pode-se dizer que uma sentença como “uma medição (*measurement*) efetuada sobre um elétron” compromete-se com a existência de uma entidade sub-atômica.

Se a linguagem de uma teoria traz consigo um comprometimento racional com a existência de uma entidade, pode-se dizer que a teoria se compromete ontologicamente com essa entidade, de tal modo que, para Quine (1966, p. 66): “[...] ser é ser o valor de uma variável”⁷¹. É importante notar que tal afirmação não diz qual ontologia é correta, mas diz como nos comprometemos com certas entidades – e, portanto, com uma ontologia num sentido O1 que as suporte.

A máxima quiniiana, contudo, poderia ser interpretada de modo a considerar que as variáveis em questão seriam variáveis dentro da linguagem da lógica clássica, *exclusivamente*. No entanto, conforme procuramos expor no capítulo anterior, podem existir dificuldades no caso de considerar a lógica clássica como a única lógica adequada para o pleno entendimento da totalidade dos fenômenos e problemas da mecânica quântica – tese com a qual não nos comprometeremos neste estudo.

Diante esta problemática, diversos apontamentos acerca de *quais desses princípios da lógica clássica podem ser revisados para a mecânica quântica* foram formulados: (i) o princípio de *não contradição*, da forma como sugerem Caettaneo, Dalla Chiara, Giuntini e Paoli (2009, pp. 127-226); (ii) o princípio do *terceiro excluído*, conforme sugere Heisenberg (1958, p. 181); (iii) a *lei de distributividade*, da forma como sugerem Birkhoff e von Neumann (1936). Não discutiremos aqui *qual* dos sistemas

⁷¹ No original: “[...] to be is to be the value of a variable”.

lógicos não clássicos⁷² seria o *mais adequado* ao contexto da mecânica quântica (nem mesmo nos comprometemos com a ideia de que *a lógica clássica seja inadequada para a mecânica quântica*), isto é, não nos comprometeremos com algum sistema não clássico em particular. Ao invés disto, nos ateremos à posição de da Costa, Krause e Bueno (2007, p. 757), para os quais outras lógicas *podem ajudar na compreensão* de certos aspectos da realidade quântica que não são facilmente explicáveis quando tratadas à maneira da lógica clássica, diferentemente da posição normativa de Birkhoff e von Neumann (1936) de que a lógica da mecânica quântica *não deve ser* a lógica clássica:

[...] a possibilidade da utilização de sistemas lógicos não clássicos nos fundamentos da física – e, de modo mais geral, nos fundamentos da ciência – não implica que a lógica clássica está errada, ou que a teoria quântica, em particular, precisa de outra lógica. Os físicos provavelmente continuarão usando a lógica clássica, informal, em um futuro próximo. Mas devemos perceber que outras formas de lógica podem nos ajudar a compreender melhor certos aspectos do mundo quântico, que não podem ser tão facilmente tratados por meios clássicos.⁷³ (DA COSTA, KRAUSE, BUENO, 2007, p. 757, ênfase nossa)

⁷² Embora seja de difícil caracterização, podemos esboçar uma descrição do paradigma lógico-clássico como segue. Quando referimos o termo “lógica não clássica”, temos em mente precisamente esta ideia, exposta por Evandro Gomes (2013, p. 3): “A caracterização das diferentes lógicas não clássicas se deve, em parte, a como essas últimas facultam ou não validade aos princípios lógicos fundamentais do pensamento dedutivo clássico. [...] Tais princípios podem ser assim enunciados formalmente: I. Princípio de Identidade: $A \rightarrow A$ ou $\forall x (x = x)$; II. Princípio do Terceiro Excluído: $A \vee \neg A$ ou $\forall x (Ax \vee \neg Ax)$; III. Princípio da Não Contradição: $\neg(A \wedge \neg A)$ ou $\forall x \neg(Ax \wedge \neg Ax)$ ”, de modo que os três axiomas produzam inferências de acordo com: “(i) Princípio da identidade - todo objeto é idêntico a si mesmo; [iii] Princípio da não contradição - uma proposição não pode ser verdadeira e falsa ao mesmo tempo; e [ii] Princípio do terceiro excluído – toda proposição é verdadeira ou falsa, não havendo outra possibilidade” (D’OTTAVIANO, FEITOSA, 2003, p. 10) – o que equivaleria com aquilo que Da Costa (1980, p. 68) chama de “grande lógica”. Gomes (2013, p. 3, nota 7) ressalta ainda que “algumas lógicas não clássicas conservam os princípios fundamentais do pensamento dedutivo clássico inalterados. Nessas lógicas variam outros elementos típicos da lógica clássica, como a categoricidade, a atemporalidade e a imutabilidade dos entes lógicos. As lógicas assim constituídas são denominadas lógicas não clássicas complementares, como, por exemplo, as lógicas modais e suas extensões e a lógica do tempo”. Uma discussão aprofundada sobre esse assunto pode ser encontrada em Da Costa (1980, 1993).

⁷³ No original: “[...] the possibility of using non-standard logical systems in the foundations of physics – and, more generally, in the foundations of science – does not entail that classical logic is wrong, or that quantum theory, in particular, needs another logic. Physicists are likely to continue to use classical, informal logic in the near future. But we should realize that other forms of logic may help us to understand better certain aspects of the quantum world that may not be so easily treated by classical means”.

Da forma como procuramos enfatizar no capítulo anterior, a *complementaridade* de Bohr seria *um* dos casos em que uma lógica *não clássica* ajudaria significativamente na compreensão dos conceitos envolvidos (cf. da Costa, Krause, 2006, p. 112). Assim, visto que consideramos a *possibilidade da utilização de sistemas lógicos não clássicos para a interpretação da mecânica quântica*, adotaremos aqui a relativização do princípio de Quine (1966), proposta pelo matemático e filósofo Newton C. A. da Costa (2002, p. 284, ênfase nossa): “penso que ser é ser o valor de uma variável *em uma dada linguagem com uma determinada lógica*”⁷⁴.

À primeira vista, os sentidos O1 e O2 do termo “ontologia” são excludentes. No entanto, tomaremos a posição de Arenhart e Krause (cf. 2012), que compatibilizam as duas acepções do termo, no preciso sentido em que O2 não implica naquilo que *de fato existe ou não*, mas somente nas entidades com as quais as teorias científicas se comprometem. Deste modo, pode-se dizer que, se o sentido O2 está diretamente associado a uma ou outra teoria *científica*, então depende de aspectos da investigação empírica (cf. Lowe, 1998). Assim, se de O2 resulta que nossos pressupostos nos comprometem ontologicamente com certo tipo de entidade, devemos *ou* aceitar uma resposta para uma questão do tipo O1 acerca de tal entidade *ou* revisar nossos pressupostos metafísicos.

Dito de outro modo, o estudo da *metafísica associada a uma teoria científica*, num sentido O2, isto é, a análise sobre os objetos que compõem o mundo adotados por essa teoria, *não exclui a possibilidade* da formulação de uma ontologia num sentido O1 baseado no *mobiliário metafísico* que a teoria fornece (cf. Arenhart, Krause, 2012, p. 45). Assim, por mais que os dois sentidos mencionados não sejam excludentes, no que tange aos propósitos da presente análise, basta dizer que assumiremos, da mesma forma que Arenhart e Krause (2012, p. 48), que “é legítimo investigar a ontologia *de uma teoria* (ou *associada a uma teoria*)” – num sentido localizado e descritivo, conforme explicitado anteriormente no sentido O2, de modo que não ambicionaremos aqui o *desenvolvimento* de uma ontologia num sentido O1.

⁷⁴ No original: “I think that to be is to be the value of a variable in a given language with a determinate logic”.

Esclarecido aquilo que chamaremos “ontologia”, passemos ao estudo de caso na *interpretação* da teoria quântica. Para delimitarmos o escopo da nossa abordagem, assumiremos a seguinte distinção proposta pelo físico Joseph M. Jauch (1968, p. 189, ênfase nossa):

Se a ciência é possível, então o mundo físico não é paradoxal. Assim, se a mecânica quântica é uma teoria física correta, ela não pode conter paradoxos. Portanto, se aparentemente ocorrem paradoxos, eles devem ter origem ou de uma teoria física inconsistente (portanto, incorreta), ou *devem indicar a limitação dos conceitos em física que adquiriram seu significado fora dos domínios da física.*⁷⁵

Seguindo este raciocínio, se não há paradoxos no mundo físico, uma ciência física correta não deve conter paradoxos. Se estes ocorrem, ou (i) a *teoria física* é inconsistente, isto é, as *operações experimentais* não têm correspondência com as *predições teóricas* devido a inconsistências lógicas no *formalismo* ou (ii) há uma limitação conceitual, *fora dos limites da teoria física*, para o estabelecimento de tal teoria. A discussão do primeiro fator não se vincula ao escopo da presente pesquisa. Isto é, não ambicionaremos discutir aspectos de física teórica neste trabalho filosófico – na qual a física quântica aparece como um *exemplo* no qual a análise filosófica se insere. Assumiremos, portanto, o ponto de vista de que a mecânica quântica não é uma teoria inconsistente em seu formalismo ou poder matemático de predição. A discussão em torno do segundo fator indica uma discussão acerca dos problemas filosóficos associados a uma teoria científica.

Isso corresponderia à problemática na *interpretação* da teoria quântica, onde Karl Popper (1982) teria identificado a ocorrência de um “cisma” na física, e que seria estabelecido em um nível não apenas físico, mas filosófico. De acordo com o físico e filósofo Osvaldo Pessoa Junior (2003, p. 5, ênfase nossa), “as teses agregadas pelas interpretações fazem afirmações sobre a *realidade existente por trás dos fenômenos*

⁷⁵ No original: “If science is possible then there is nothing paradoxical about the physical world, and insofar as quantum mechanics is a correct physical theory it cannot contain paradoxes. Thus if paradoxes seem to appear, they must originate either from an inconsistent (and hence incorrect) physical theory, or they must indicate the limitation of concepts in physics which have acquired their meaning outside the domain of physics”.

observados". Não entenderemos esta afirmação como a alegação de um compromisso ontológico com algum tipo de *transfenomenalismo*, isto é, com uma *realidade que existe* por trás das observações – como o trecho que grifamos parece indicar. Ao invés disso, tomaremos tal afirmação como a indicação de que os problemas filosóficos associados às teorias científicas são de um *nível teórico diferente do nível empírico*. Isto é, não significa que a interpretação da mecânica quântica se compromete com a realidade transfenomenal, mas que as teses acerca da *interpretação* da teoria quântica se preocupariam com o debate ontológico sobre o mundo – que excede a totalidade das observações feitas em laboratório.

Guiaremos nossa análise assumindo que o cerne do debate entre as concepções interpretativas para a teoria quântica estaria na *escolha filosófica* feita por cada um de seus proponentes, e que precisamente *esta escolha* é o *pressuposto ontológico* O2 a partir do qual a sequência argumentativa é desencadeada. Analisaremos neste capítulo o debate entre Einstein e Bohr para visualizar tal assunção.

De acordo com Murdoch (1994, p. 303), já em 1927 as teses associadas à interpretação da *complementaridade* seriam consideradas como uma atitude dominante entre os físicos. No entanto, Einstein nunca teria condescendido à atitude dessa interpretação. Em especial, se opunha aos pressupostos ontológicos da atitude ortodoxa no que se refere ao *indeterminismo* implicado pelo *princípio da indeterminação* de Heisenberg e às considerações acerca da *causalidade* propostas pela *complementaridade* de Bohr, mas, sobretudo, se opunha à tese do *distúrbio interacional*, mencionada no capítulo anterior, convicto de que os estados não observados possuem propriedades bem definidas.

De fato, como observa Faye (1991, pp. 135-136), o argumento do *distúrbio* é *clássico* na medida em que pressupõe a separabilidade, isto é, pressupõe que todos os objetos especialmente distintos *existem* em distintos estados físicos. Dito de outro modo, um aparelho de medição só poderia *perturbar* um objeto que já *esteja lá para ser perturbado*, o que parece indicar uma implicação essencialmente *clássica*. No entanto, a

descrição ortodoxa afirma que, a princípio, o conhecimento empírico de tais estados é impossibilitado pelo *postulado quântico*. Assim, a afirmação do *distúrbio interacional* é confusa e abriu espaço para muitas críticas na década de 30. Dentre elas, e talvez a principal, viria por parte de Einstein.

Max Jammer (1974, pp 166-181) apresenta, em uma perspectiva histórica, as críticas de Einstein em relação à *atitude ortodoxa* frente à teoria quântica. Segundo Jammer (1974, p. 156), até 1930, a preocupação de Einstein estaria voltada à refutação da interpretação da *complementaridade* em sua própria estrutura interna, de modo a procurar uma *inconsistência* nas propostas de Heisenberg e Bohr. A partir dessa época, Einstein teria deliberadamente *abandonado* os argumentos em relação à *inconsistência* e concentrado seus esforços na tentativa de provar a *incompletude* da teoria quântica, da forma como interpretada pela *atitude ortodoxa*.

Para Jammer (1974, p. 120), tal debate seria “um dos grandes debates na história da física, comparável, talvez, apenas com a discussão entre Newton e Leibniz no início do século XVIII”⁷⁶. Para Folse (1994, p. 126), o pensamento de Bohr só poderia ser considerado totalmente *maduro* após discussões estabelecidas com Einstein, principalmente no que diz respeito ao conceito de medição. Isto é, *se* antes de tal debate Bohr haveria endossado a tese do *distúrbio*, depois dele, certamente, isso já não mais seria o caso.

No presente capítulo, discutiremos o debate entre Einstein e Bohr em relação à *completude* da mecânica quântica sob uma perspectiva filosófica, enfatizando o comprometimento ontológico subjacente aos argumentos dos dois autores a fim de compreendermos como tal comprometimento direciona ou ao menos influencia a concepção da *interpretação* da teoria quântica de cada autor. Para tanto, iniciaremos com a análise do famoso artigo de Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen (1983 [1935]), doravante “EPR”, intitulado “*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*”, publicado em 1935 na revista *Physical*

⁷⁶ No original: “[...] one of the great scientific debates in the history of physics, comparable, perhaps, only to the Newton-Leibniz controversy of the early eighteenth century”.

Review. O artigo, redigido por Podolsky (cf. Fine, 1986, p. 35), questiona a atitude ortodoxa frente à noção de *medição*, como buscaremos enfatizar na subseção que segue abaixo.

2.3 O artigo EPR

Da forma como interpretada por EPR (1983 [1935]), a visão ortodoxa sustentaria que as propriedades dos objetos não teriam valores definidos simultaneamente, devido à impossibilidade da medição de tais quantidades, isto é, que o estado de um objeto individual em qualquer tempo determinado não teria valores definidos para todas as suas quantidades físicas. De acordo com Murdoch (1994, p. 304), o artigo EPR (1983 [1935]) propõe um contra-exemplo, mediante um *experimento de pensamento* (*Gedankenexperiment*), em que medições precisas e simultâneas *pudessem ser efetuadas* sobre as propriedades observáveis.

O argumento⁷⁷ EPR (1983 [1935]) se baseia, de acordo com Jammer (1974, p. 184), em quatro premissas principais, onde as duas primeiras são *formuladas* e duas últimas são *assumidas*. Seguiremos a reconstrução de Jammer (1974, p. 184), embora não seja a ordenação do artigo original (EPR, 1983 [1935], p. 138, ênfase nossa). São elas:

1) *critério de realidade*:

Os elementos de realidade física não podem ser determinados por considerações filosóficas a priori, mas têm de ser encontrados por meio de resultados experimentais

⁷⁷ Tal raciocínio é frequentemente referido sob a nomenclatura de “*paradoxo EPR*”. No entanto, seguiremos a proposta de Jammer (1974, p. 187-188) de optar pelo termo “*argumento EPR*” visto que EPR (1983 [1935]) nunca consideraram sua tese como um *paradoxo*, nem no sentido medieval de insolubilidade, nem no sentido moderno de uma antinomia sintática ou semântica. O primeiro autor a considerar o argumento EPR como paradoxal foi o físico Erwin Schrödinger (1935, p. 556) no sentido etimológico do termo *paradoxo*, isto é, no sentido de ser *contrário à opinião corrente* na medida em que o argumento EPR (1983 [1935]) implicaria na renúncia do princípio de *localidade*, um princípio deveras intuitivo na época (e até mesmo nos dias de hoje), ou seja, *favorável à opinião corrente*. Deve ficar claro que trataremos aqui do argumento *conforme exposto por EPR* (1983 [1935]), deixando de lado, portanto, formulações posteriores tal como a do físico David Bohm (1951, pp. 611-623).

*e medições.[...] Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, podemos prever com segurança (isto é, com uma probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento da realidade física correspondente a esta quantidade física.*⁷⁸

2) *critério de completude*: uma teoria é completa se e somente se “[...] cada elemento da realidade física tem uma contrapartida na teoria física”⁷⁹ (EPR, 1983 [1935], p. 138);

3) *assunção da localidade*: se “no momento da medição de [...] dois sistemas que já não mais interagem, nenhuma mudança real pode ocorrer no segundo sistema em consequência de qualquer coisa que possa ser feito com o primeiro sistema”⁸⁰ (EPR, 1983 [1935], p. 140); e, por fim,

4) *assunção da validade*: “[...] as previsões estatísticas da mecânica quântica – na medida em que sejam relevantes para o argumento em si – são confirmadas pela experiência”⁸¹ (JAMMER, 1974, p. 184).

É notável que a formulação do *critério de realidade* é bastante fiel aos conceitos clássicos de *realidade física* na medida em que considera a realidade física “algo” cuja existência espaço-temporal seja objetiva e independente. De acordo com Jammer (1974, p. 184), a estrutura do argumento seria tal que, sob a base fornecida por 1), as assunções 3) e 4) implicariam que a mecânica quântica (ortodoxa) não satisfaria o critério 2), que é o critério de completude. Como um corolário, a descrição fornecida por tal teoria seria, então, *incompleta*.

Enunciados os critérios, passemos à análise do *experimento de pensamento*. Dois objetos quânticos individuais, A e B, separados espacialmente depois de interagirem

⁷⁸ No original: “The elements of the physical reality cannot be determined by a priori philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. [...] If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity”.

⁷⁹ No original: “[...] every element of the physical reality has a counterpart in the physical theory”.

⁸⁰ No original: “at the time of measurement [...] two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system”.

⁸¹ No original: “[...] the statistical predictions of quantum mechanics – at least to the extent they are relevant to the argument itself – are confirmed by experience”.

um com o outro, seriam medidos⁸². De acordo com o entendimento de EPR (1983 [1935]), a mecânica quântica ortodoxa prevê que A *perturba* o sistema B de forma descontínua. Antes da medição, A e B não possuiriam propriedades bem definidas e, após a medição em algum deles, uma quantidade física poderia ser determinada sobre o outro. E justamente essa seria a forma como operaria o *princípio da indeterminação*, segundo o qual o *conhecimento* pleno e simultâneo de A e B não seria possível visto que, da forma como tal relação fora interpretada por EPR (1983 [1935]), a medição de uma quantidade física de algum dos pares implica *perturbação* ou *distúrbio* do outro. Neste sentido, A e B seriam quantidades físicas *incompatíveis*.

Tendo em vista esses pontos, podemos passar ao argumento EPR (1983 [1935]), conforme formulado pelo físico e filósofo Sílvio Seno Chibeni (cf. 1997, p. 40). Se as “quantidades físicas incompatíveis” – A e B – tem realidade simultânea e se a descrição quântica da realidade é completa, então a mecânica quântica deveria fornecer valores precisos e simultâneos para as quantidades incompatíveis A e B. No entanto, de acordo com o princípio de indeterminação, a mecânica quântica não fornece tais valores precisos simultâneos para os valores das propriedades de, por exemplo, *posição* e *momento* de um objeto quântico e, por isso, tais propriedades são referidas como *quantidades incompatíveis*. Assim, *ou a descrição quântica da realidade não é completa, ou as quantidades físicas incompatíveis não podem ter realidade simultânea*⁸³.

⁸² Devemos enfatizar que estamos tratando aqui do experimento mental *clássico* EPR (1983 [1935]), e não de suas reformulações mais recentes – tal como a de Bohm (1951).

⁸³ A disjunção “ou” do argumento é originalmente introduzida sob a forma de uma contradição, conforme aponta a reconstrução de Chibeni (1997, p. 40), que traduz fielmente o argumento EPR (1983 [1935]) em linguagem proposicional clássica – que adaptamos com algumas modificações. Que sejam:

C: A descrição quântica da realidade é completa;

RS: Quantidades físicas “incompatíveis” podem ter realidade simultânea;

ψ^{AB} : A MQ [mecânica quântica] fornece valores precisos e simultâneos para as quantidades ‘incompatíveis’ A e B.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. $(RS \wedge C) \rightarrow \psi^{AB}$ | [Premissa: definição de completude] |
| 2. $\neg\psi^{AB}$ | [Premissa: teoria quântica] |
| 3. $\neg(RS \wedge C)$ | [1 e 2 modus tollens] |
| 4. $\neg C \vee \neg RS$ | [3 lei de De Morgan] |
| 5. $C \rightarrow RS$ | [Hipótese: critério de realidade EPR] |
| 6. $C \rightarrow \neg RS$ | [4 silogismo disjuntivo] |
| 7. $C \rightarrow (RS \wedge \neg RS)$ | [5 e 6] |

Como o *critério de realidade* adotado por EPR (1983 [1935]) implica realidade simultânea⁸⁴ das quantidades físicas incompatíveis, deve-se negar a completude da descrição quântica da realidade. Assim, “somos forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física, fornecida pelas funções de onda, não é completa”⁸⁵ (EPR, 1983 [1935], p. 141).

Fazemos referência, também, à reconstrução de Murdoch (1994, pp. 305-306, ênfase nossa) do argumento EPR (1983 [1935]), que deduz uma *invalidade* no argumento, retomada adiante.

- a) Se podemos prever com certeza o valor de uma quantidade de um objeto em um tempo t , sem perturbar o objeto de qualquer forma, então este valor é fisicamente real em t (a condição suficiente da realidade física).
- b) Na situação EPR, sem perturbar objeto B de qualquer forma, podemos prever com certeza quer a posição definitiva de B no tempo t ou o momento definitivo de B em t , mas não os dois (uma consequência do experimento EPR).
- c) O estado físico de B no tempo t é o mesmo, independentemente da medição feita em A ou a previsão correspondente feita sobre B.
- d) Então, o estado físico de B no tempo t contém valores definidos, tanto de posição quanto de momento.
- e) Se uma teoria física é completa, e se determinadas quantidades de um objeto tem valores que são fisicamente reais no tempo t , então tal teoria tem uma descrição do estado do objeto em t que inclui esses valores (a condição necessária da completude).

8. ¬C

[Conclusão: 7 redução ao absurdo]

O uso termo “contradição”, conforme empregado no raciocínio, precisamente após o condicional da etapa “7” da reconstrução acima, deve ser entendido à maneira da *lógica clássica*. Devemos qualificar tal afirmação, pois consideramos anteriormente a *legítima possibilidade da utilização de lógicas não clássicas na interpretação da mecânica quântica*. Tal situação ocorre na medida em que a discussão acerca de uma interpretação da mecânica quântica acontece no plano meta-linguístico, que corresponde a uma *porção restrita da linguagem natural*. Em tal meta-linguagem, as regras semânticas são *pressupostas, portanto não formalizadas*; assim, a discussão meta-linguística acontece em linguagem natural e, por conseguinte, obedece às regras deste discurso que tem a lógica clássica como linguagem subjacente (cf. Church, 1996, p. 50-55). Apresentamos o argumento EPR (1983 [1935]) de modo formalizado por questões de clareza; a discussão que apresentamos em torno da semântica do argumento, no entanto, continua obedecendo às “regras” meta-linguísticas da linguagem natural: a lógica clássica. Ademais, como aponta Murdoch (1994, p. 306), o argumento original, conforme formalizado acima, tem uma estrutura *inválida*.

⁸⁴ O que fica claro, pois na ontologia realista todos os objetos possuem realidade independente – logo, simultânea. Assim, o estatuto de realidade simultânea é subsidiário ao estatuto de realidade objetiva.

⁸⁵ No original: “we are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete”.

f) Nenhuma descrição quântico-mecânica de um objeto no tempo t inclui os valores definidos para a posição eo momento em t .

g) Portanto, a descrição da mecânica quântica de um objeto é incompleta.⁸⁶

Nessa reconstrução, Murdoch (1994, p. 306) observa que o argumento seria *inválido* na medida em que a subconclusão “d)” não é consequência direta das premissas. Como o artigo EPR (1983 [1935]) não é o objeto central de nossa análise, tomaremos como suficiente aquilo que foi exposto até aqui.

Nesse mesmo ano, em resposta a EPR (1983 [1935]), Bohr (1983 [1935], pp. 145-146) escreve um artigo argumentando em defesa do *princípio de indeterminação*. Nele, afirmou que:

A *aparente* contradição [apontada no artigo de EPR] só evidencia uma *inadequação essencial da perspectiva filosófica usual* [clássica] de fornecer uma descrição racional dos fenômenos físicos do tipo que estamos interessados na mecânica quântica. De fato, a *interação finita entre objeto e as agências de medição*, condicionadas pela própria existência do quantum de ação, implica – devido à impossibilidade de controlar a reação provocada pelo objeto nos instrumentos de medição, se estes devem servir a seus propósitos – a necessidade de uma renúncia final ao ideal clássico de causalidade e uma revisão radical de nossa atitude perante o problema da realidade física.⁸⁷

⁸⁶ No original: “a) If we can predict with certainty the value of a quantity of an object at a time t without disturbing the object in any way, then this value is physically real at t (the sufficient condition of physical reality). b) In the EPR situation, without disturbing object B in any way, we can predict with certainty either the definite position of B at time t or the definite momentum of B at t , but not both (a consequence of the EPR experiment). c) The physical state of B at time t is the same, regardless of the measurement made on A or the corresponding prediction made about B. d) Therefore the physical state of B at time t contains definite values of both position and momentum. e) If a physical theory is complete, and certain quantities of an object have values which are physically real at time t , then the theory has a state description of the object at t which includes these values (the necessary condition of completeness). f) No quantum-mechanical description of an object at time t includes definite values for position and momentum at t . g) Therefore the quantum-mechanical description of an object is incomplete”.

⁸⁷ No original: “The apparent contradiction in fact discloses only an essential inadequacy of the customary viewpoint of natural philosophy for a rational account of physical phenomena of the type with which we are concerned in quantum mechanics. Indeed the finite interaction between object and measuring agencies conditioned by the very existence of the quantum of action entails – because of the impossibility of controlling the reaction of the object on the measuring instruments if these are to serve their purpose – the necessity of a final renunciation of the classical ideal of causality and a radical revision of our attitude towards the problem of physical reality”.

Podemos observar que é precisamente em relação ao critério de realidade, assumido por EPR (1983 [1935]), e chamado de “clássico” por Farias (cf. 1987, p. 53), que Bohr (1983 [1935]) se posiciona contrariamente na passagem acima. Tal rejeição parece indicar a necessidade de uma revisão ontológica para as teorias físicas, ou ainda uma revisão na *semântica*, isto é, uma revisão nos *limites de aplicação* e na definição dos *conceitos* envolvidos, tal como o conceito de “realidade física”. Neste mesmo artigo, diz Bohr (1983 [1935], p. 145):

A possibilidade de atribuir de significado inequívoco a expressões tais como “realidade física” não pode, evidentemente, ser deduzida a partir de concepções filosóficas *a priori*, mas – como os autores do artigo citado [EPR] enfatizam – deve ser fundamentada no recurso direto a experiências e medições.⁸⁸

Segundo este raciocínio, se toda medição é limitada à informação que se obtém por meio dela, esta limitação se estende ao *significado* que se pode atribuir por meio dela – o que é uma consequência direta da atitude operacionista assumida por Bohr (1983 [1928], pp. 89-90) nos fundamentos da interpretação da complementaridade, de modo que não seria significativa a atribuição de um estatuto ontológico (num sentido *tradicional* ou *clássico* como vimos acima) da realidade “em si”, bem como o estabelecimento das suas propriedades intrínsecas, fora do contexto do aparato medidor utilizado. Murdoch (1994, p. 304) reconstrói o contra-argumento da seguinte forma:

1. Quantidades conjugadas não podem ser medidas simultaneamente, uma vez que são necessárias operações experimentais mutuamente exclusivas para a sua medição.
2. A medição envolve uma interação ineliminável entre o objeto e o instrumento [de medição].
3. A interação com a medição é indeterminável, já que qualquer tentativa de medir isso implicaria uma mudança no arranjo experimental e mais uma interação que impediria a medida original.

⁸⁸ No original: “The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as “physical reality” cannot of course be deduced from a priori philosophical conceptions, but – as the authors of the article cited themselves emphasize – must be founded on a direct appeal to experiments and measurements”.

4. Portanto os resultados das medições sucessivas de quantidades conjugadas não podem ser atribuídos, por uma extrapolação temporal.⁸⁹

De acordo com essa linha de raciocínio, o tipo de experimento que EPR (1983 [1935]) propuseram não seria possível, pois os termos como “posição” ou “momento” só teriam significado quando associados a uma operação experimental, e, uma vez que só podem ser designados experimentos mutuamente exclusivos para verificar o valor de verdade de tais termos, não se poderia atribuir significado a uma sentença como “valores definidos simultaneamente de posição e momento”.

Tal atitude indica, no limite, que as operações experimentais deveriam ser condições necessárias para a *definição* de sentenças tais como “a posição (ou momento) exata”. Na medida em que as operações experimentais necessárias para a definição das propriedades observáveis dos objetos quânticos são mutuamente exclusivas, as condições para suas definições também o seriam. Dito de outro modo, o contexto experimental deveria determinar e limitar a expressão “realidade física”. No limite desta interdependência, diz Bohr (1983 [1928], p. 89, ênfase nossa), como destacamos no capítulo anterior, que “[...] uma realidade independente, no sentido físico usual [clássico], não pode ser atribuída *nem ao fenômeno nem às agências de observação*.”⁹⁰ Como afirma Chibeni (1997, p. 47),

Bohr parece assim afirmar que o contexto experimental influencia as condições que determinam o uso legítimo da expressão ‘realidade física’. Ao empregá-la como fazem os realistas, ou seja, para referir-se a um mundo objetivo, independente do contexto de observação, Einstein e seus colaboradores [Podolski e Rosen] estariam incorrendo em ambiguidades linguísticas, o que invalidaria o seu argumento.

⁸⁹ No original: “1. Conjugate quantities cannot be measured simultaneously, since mutually exclusive experimental arrangements are required for their measurement. 2. Measurement involves an ineliminable interaction between the object and the instrument. 3. The measurement interaction is indeterminable, since any attempt to measure it would entail a change in the experimental arrangement and a further interaction that would preclude the original measurement. 4. Therefore, the results of successive measurements of conjugate quantities cannot be assigned by extrapolation to the same time”.

⁹⁰ No original: “[...] an independent reality in the ordinary physical sense can neither be ascribed to the phenomena nor to the agencies of observation.”

De fato, é natural na mentalidade científica, anteriormente ao advento da teoria quântica, a concepção de que o mundo que nos circunda possui um estatuto ontológico de existência independente. Isto é, que os objetos que o compõem (átomos, partículas, prédios e montanhas) se limitariam a “estar lá” de forma objetiva, a despeito da observação de qualquer sujeito – o que facilmente coaduna com nossa mentalidade intuitiva. Se as coisas fossem assim, então as propriedades desses objetos *existiriam* e teriam propriedades *bem definidas* antes ou após uma medição, ou seja, *a despeito de qualquer possível medição ou observação*. É justamente esta a definição da noção de “realidade objetiva” utilizada no argumento EPR (1933 [1935]).

Essa noção é compatível com a acepção do termo “ontologia” chamada por Krause (2006) de “clássica” ou “tradicional” – que chamamos neste estudo de “(1)” –, bem como com diversas formas de realismo. Para o filósofo Raymond D. Bradley (cf. 2000, pp. 3-4), a posição einsteiniana perante a teoria quântica é fruto de duas posições filosóficas complementares: (i) o *realismo metafísico* e (ii) o *realismo científico*. Grosso modo, tais acepções do termo “realismo” se comprometem com as seguintes teses: (i) *há uma (única) realidade física que existe objetivamente, independente de qualquer teoria, vontade, consciência ou observador* e (ii) *é tarefa da ciência descrever corretamente esta realidade por meio das melhores teorias*. Estas duas concepções foram sintetizadas por Krause (2006, p. 36-37) da seguinte maneira:

De certo modo, por meio das teorias físicas, *descobrimos* as características dos objetos (ou coisas) que formam essa ontologia, ainda que façamos isso por aproximações, mas nunca a *construímos*, ou elaboramos. [...] [N]ão há sentido em se dizer que nossas teorias constroem, ou compõem uma ‘realidade física’. Esta estaria lá, e seria de um modo que procuraríamos descrever e conhecer, ainda que talvez nunca possamos saber se de fato alcançamos este objetivo.

2.4 Einstein e Bohr

Em uma carta endereçada a Schrödinger, datada de 19 de Junho de 1935, Einstein (*apud* Fine, 1986, p. 35, nota 9, ênfase nossa) afirmaria que:

Por razões de linguagem, este [artigo EPR] foi escrito por Podolsky depois de muita discussão. Ainda assim, o artigo não saiu da forma como eu originalmente gostaria; ao contrário, o ponto essencial foi, por assim dizer, obscurecido pela erudição⁹¹.

A maior ênfase do artigo EPR (1935 [1935]) foi dada na discussão sobre a possibilidade ou impossibilidade de atribuir valores bem definidos simultaneamente para os pares observáveis (como posição e momento), discussão esta sobre a qual, na mesma carta, Einstein (*apud* Fine, 1986, p. 38) expressa seu descontentamento através da expressão “*ist mir wurst*” – traduzida por Fine (1986, p. 38) como “*I coulnd’t care less*” e por Chibeni (1997, p. 56) como “não ligo a mínima”.

De fato, Einstein (1949a, p. 88) não considerava que a noção de *valores simultaneamente bem definidos* para os observáveis fosse *indispensável* na teoria quântica. Em um sentido mais forte, não há um comprometimento ontológico, da parte de Einstein (1949a, p. 87), com a noção de que os objetos tenham *a priori* valores definidos de posição e momento, mas somente “[...] de acordo com o quadro total de nossa construção teórica”⁹². Para Murdoch (1994, p. 316), a própria concepção de Einstein (1949b, p. 699, ênfase nossa) frente à ontologia da física é subjacente a tal raciocínio, segundo a qual:

“*Ser*” é sempre algo mentalmente construído por nós, isto é, algo que nós livremente postulamos (no sentido lógico). A justificativa de tais construções

⁹¹ No original: “*For reasons of language this was written by Podolsky after much discussion. Still, it did not come out as well as I had originally wanted; rather, the essential thing was, so to speak, smothered by formalism*”

⁹² No original: “[...] *within the framework of our total theoretical construction*”.

não reside na sua derivação a partir do que é dado pelos sentidos [...] [mas] em sua qualidade de tornar inteligível o que é sensorialmente dado [...].⁹³

Tal concepção é, para Murdoch (1994, p. 316), essencialmente *contrária ao positivismo*, na medida em que afirma que a *realidade não se reduz à experiência sensorial* – o que não implica uma posição *idealista*, isto é, de que *não exista uma realidade extra-mental*. Assim, a noção de “realidade” deveria ser tomada mais como um *programa*⁹⁴ ou *meta*, ao invés de algo sobre a qual se deva aceitar *a priori* (cf. Einstein, 1949b, p. 674). Para Murdoch (1994, p. 316, ênfase nossa), a conclusão é de que “[...] *não é a priori que todos os objetos físicos, sejam eles clássicos ou quânticos, tenham em qualquer momento posição e momento definidos.*”⁹⁵

Assim, se Einstein (1949a, p. 88) considerava a noção de “valores simultâneos para as propriedades observáveis dos objetos quânticos” uma *construção racional*, então, da mesma forma que foi livremente *construída*, poderia – e *deveria*, na incidência de situações paradoxais – ser livremente *abandonada*. No entanto, abandonada *totalmente* – e não *parcialmente*, isto é, abandonada na mecânica quântica, mas mantendo-a para a mecânica clássica, da forma como o *princípio da correspondência* de Bohr parece sugerir.

Já o referido “ponto essencial” (*apud* Fine, 1986, p. 35, nota 9), omitido no artigo EPR (1983 [1935]), é retomado por Einstein (1950, pp. 59-97) posteriormente em um artigo intitulado “*Physik und Realitdt*”, que traduzido livremente significa *Física e Realidade*. Seguiremos aqui a reconstrução dos argumentos de Einstein (1950)

⁹³ No original: “‘Being’ is always something which is mentally constructed by us, that is, something which we freely posit (in the logical sense). The justification of such constructs does not lie in their derivation from what is given by the senses [...] [but] in their quality of making intelligible what is sensorily given [...]”

⁹⁴ Uma afirmação desse tipo parece harmonizar com o pensamento de Kuhn (1998, p. 253) em relação à discussão metafísica nas teorias científicas (mais precisamente, ontológicas num sentido O1) quando, algumas décadas mais tarde, afirma que: “Ouvimos frequentemente dizer que teorias sucessivas se desenvolvem sempre mais perto da verdade ou se aproximam mais e mais desta. Aparentemente generalizações desse tipo referem-se [...] à sua ontologia, isto é, ao ajuste entre as entidades com as quais a teoria povoa a natureza e o que ‘está realmente aí’. [...] Parece-me que não existe maneira de reconstruir expressões como ‘realmente aí’ sem auxílio de uma teoria; a noção de um ajuste entre a ontologia de uma teoria e sua contrapartida ‘real’ na natureza parece-me ilusória por princípio”.

⁹⁵ No original: “[...] it is not a priori that all physical objects, be they classical or quantum-mechanical, have at any time a definite position and momentum”.

proposta por Murdoch (1994, p. 309, ênfase nossa), segundo a qual o argumento pode ser estruturado da seguinte maneira:

1. Em um experimento EPR, o estado físico do objeto pode ser descrito quer pelo vetor de estado ψ ou o vetor estado \emptyset , dependendo do tipo de medição que fazemos em outro objeto, distante, A.
2. O estado físico de um objeto não depende do tipo de medição que fazemos no outro objeto ou sobre o estado físico do outro objeto (o princípio da separação).
3. Portanto, no experimento EPR, o objeto B está no mesmo estado físico, quer seja descrito por ψ ou \emptyset .
4. Um vetor de estado fornece uma descrição completa do estado físico de um objeto apenas se descrever exclusivamente esse estado (a condição completude).
5. Na situação EPR, o estado físico do objeto B pode ser descrito quer por ψ ou \emptyset .
6. Assim, nem ψ nem \emptyset fornecem uma descrição completa do estado físico do B.
7. Portanto, o vetor de estado não fornece uma descrição completa do estado físico de um objeto.⁹⁶

Uma análise exaustiva do argumento de Einstein está para além dos propósitos de nosso texto, motivo pelo qual assumiremos que a reconstrução feita por Murdoch (1994, p. 309) é suficiente. No entanto, é relevante para nossa análise a discussão de algumas implicações filosóficas, especialmente nos pontos 2 e 4 da reconstrução acima.

Em outros textos, Einstein (1949b, pp. 681-682) argumenta que o referido *princípio de separação*, contido na premissa 2, se divide em dois outros aspectos principais: o *princípio da localidade* e o *princípio da existência independente*. De acordo com o primeiro, o que *acontece* em uma determinada localização no espaço *independe* do que *acontece* em outra determinada localização no espaço, ou seja, *não há uma ação à distância imediata ou instantânea entre objetos que ocupam diferentes lugares no espaço*. De acordo com o último aspecto, o que *existe* em uma determinada localização do espaço

⁹⁶ No original: “1. In an EPR experiment, the physical state of the object B may be described either by the state vector ψ or the state vector \emptyset , depending upon what kind of measurement we make on another, distant object A. 2. The physical state of an object does not depend on the kind of measurement that we make on the other object or on the physical state of the other object (the separation principle). 3. Therefore in the EPR experiment, whether it is described by ψ or \emptyset , object B is in the same physical state. 4. A state vector provides a complete description of the physical state of an object only if it uniquely describes that state (the completeness condition). 5. In the EPR situation the physical state of the object B can be described either by ψ or \emptyset . 6. Therefore neither ψ nor \emptyset provides a complete description of the physical state of B. 7. Therefore the state vector does not provide a complete description of the physical state of an object”.

independe daquilo que *existe* em outra determinada localização no espaço, isto é, o princípio da existência independente afirma que *não há uma conexão ontológica imediata ou instantânea entre objetos que ocupam diferentes lugares no espaço*. Para Murdoch (1994, p. 310), este seria o referido *ponto crucial* omitido no artigo EPR (1983 [1935]), sugerindo ainda, que sua omissão seria o principal motivo pelo qual o argumento fora tão suscetível às críticas.

Já no *princípio de completude*, contido no ponto 4 da reconstrução de Murdoch (1994, p. 309), Einstein (*apud* Howard, 1985, p. 179) assume a existência de *somente uma descrição completa* de um sistema físico. Os argumentos sobre completude são encontrados em detalhe nas notas autobiográficas de Einstein (1949a, pp. 83-87), nas quais há a afirmação de que se uma *função de onda* fornece uma descrição completa da realidade – segundo os termos da sua própria noção de completude explicitada acima –, então existiriam casos em que a medição deveria ser considerada como um ato de *criação* ao invés de um ato de *revelação* do valor de um objeto medido.

Dito de outro modo, uma descrição *completa* de um aspecto físico da realidade seria *uma descrição do estado real de um objeto real*. Assim, se uma descrição completa não fornece um valor definido para uma propriedade observável do objeto em questão, significa que tal objeto *não tem* um valor definido para a propriedade observável. No entanto, uma medição subsequente mostraria um valor definido para tal propriedade, precisamente daquela propriedade que *não tinha* um valor definido. Como consequência, se assumido o princípio de completude, a medição *cria* a quantidade definida de uma propriedade observável – e, por conseguinte, num sentido mais forte, a *realidade física* desta propriedade – ao invés de *revelar* uma propriedade (ou a realidade física de tal propriedade) pré-existente. Este aspecto da medição se refere ao princípio da *medição=criação*.

Esta conclusão seria, no entanto, conflitante com a visão einsteiniana de mundo, de acordo com a qual a existência da realidade física independe ontologicamente de uma medição. Para Einstein (1949a, p. 667, ênfase nossa), a meta de uma teoria física deveria ser a de fornecer “[...] a descrição completa de qualquer

situação real (e individual, que supostamente *existe independentemente de qualquer ato de observação ou comprovação*)⁹⁷. Assim, seguindo a linha de raciocínio aqui proposta, o *princípio da separação* e o *princípio da completude* seriam princípios *mutuamente exclusivos*. Einstein (1949 b, p. 682) teria optado por manter *apenas* o *princípio da separação* e, da forma como interpreta a posição de Bohr, a interpretação *ortodoxa* optaria por manter *apenas* o *princípio da completude*.

Em suma, Einstein teria três razões principais, de acordo com Murdoch (1994, p. 317) para discordar *daquilo que entendera como a opção ortodoxa pelo princípio da completude*: em primeiro lugar seria a rejeição da teoria *positivista* do significado assumida por Bohr; em segundo lugar estaria a rejeição da tese da medição=criação; em terceiro lugar – que Murdoch (1994, p. 317) enfatiza como a *razão principal* para o posicionamento de Einstein frente à questão da completude – estaria a rejeição do princípio da completude como *um todo*, na medida em que é mutuamente exclusivo em relação ao princípio da separação, princípio este muito caro para a visão einsteiniana por *negar uma ação a distância ou uma conexão ontológica simultânea entre as propriedades de dois objetos espacialmente separados*. Voltamos a enfatizar que esta seria a leitura de Einstein (1949a) sobre a interpretação ortodoxa, e, principalmente, do pensamento de Bohr – o que, como veremos adiante, não corresponde necessariamente à tese do próprio Bohr.

De acordo com Murdoch (1994, p. 311) embora nunca tenha discutido em detalhe o artigo de Einstein (1950, pp. 59-97), Bohr (1958a, p. 61) rejeita o raciocínio com a mesma estrutura argumentativa em que rejeita o argumento EPR (1983 [1935]; cf. Bohr, 1983 [1935]).

Vale lembrar que a proposta no artigo EPR (1983 [1935]) seria a análise de uma situação em que seria possível atribuir valores bem definidos para as propriedades observáveis de dois objetos A e B. Na visão de Bohr, a tentativa para esta atribuição de valores seria, em princípio, equivocada, na medida em que

⁹⁷ No original: “[...] *the complete description of any (individual) real situation (as it supposedly exists irrespective of any act of observation or substantiation).*”

qualquer afirmação sobre os valores bem definidos de tais propriedades só seria dotada de significado em condições experimentais mutuamente exclusivas. Assim, para Murdoch (1994, p. 311-312), no caso EPR (1983 [1935]), as condições experimentais que permitiriam uma afirmação dotada de significado sobre a propriedade x de um objeto A excluiriam as condições experimentais que permitiriam uma afirmação dotada de significado sobre o valor bem definido da propriedade y deste mesmo objeto.

Da mesma forma, as condições experimentais escolhidas para determinar o estado de A constituiriam as condições para que se pudesse fazer qualquer tipo de inferência significativa sobre o objeto B, uma vez que a premissa do princípio da *separação* é rejeitada. Logicamente, é rejeitada também a subconclusão 3 de sua reconstrução do argumento de Einstein, isto é, a rejeição de que os valores das propriedades observáveis de B, quer seja x ou y , *independe* dos valores das propriedades observáveis de A. Assim,

[...] nenhuma utilização bem definida do conceito de “estado” pode ser feita, como referindo-se ao objecto separado do corpo com o qual tenha estado em contato, até que as condições externas envolvidas na definição deste conceito sejam inequivocamente fixadas por um controle mais adequado do corpo auxiliar.⁹⁸ (BOHR, 1958a, p. 21)

A situação proposta sugere que é correta a interpretação einsteiniana (Einstein, 1949b, p. 682) de que Bohr rejeita o princípio da localidade. A argumentação de Bohr, de acordo com Murdoch (1994, p. 312) não parece implicar existência de uma interdependência *causal* ou *mecânica* entre os objetos A e B no que se refere ao ato da *medição*, mas, ao invés disso, que a medição efetuada em A determina as condições sobre aquilo que pode ser *dito* significativamente sobre B. Assim, não se trataria de uma rejeição do princípio da localidade como um princípio causal, mas da rejeição do princípio de localidade como um princípio *semântico*, isto

⁹⁸ No original: “[...] no well-defined use of the concept of “state” can be made as referring to the object separate from the body with which it has been in contact, until the external conditions involved in the definition of this concept are unambiguously fixed by a further suitable control of the auxiliary body”.

é, seria o caso de afirmar que há uma interdependência *semântica* – mas não *causal* –, por meio de uma *operação experimental* ou *medição* entre os objetos A e B. A rejeição por parte de Bohr do *princípio de localidade* é amplamente conhecida e difundida nos livros-texto sobre mecânica quântica, ainda que por muitas vezes a ênfase não seja dada no aspecto *semântico* de tal princípio.

No entanto, a *localidade* seria um dos dois aspectos que compõem um princípio maior, o *princípio da separação*. O outro aspecto do princípio da separação seria o *princípio da existência independente*, em relação ao qual a posição de Bohr é menos clara. Como foi exposto anteriormente, o princípio da *separação* (cujo princípio da existência independente seria um de seus aspectos) é *mutuamente exclusivo* em relação ao *princípio da completude* que, por sua vez, implicaria na tese da medição=criação (cf. Einstein, 1949a, pp. 83-87), tese que Bohr (1949, p. 237, ênfase nossa) parece rejeitar:

[...] A discussão dos problemas epistemológicos na física atômica atraiu tanta atenção como nunca e, ao comentar sobre as visões de Einstein no que diz respeito à incompletude de modo de descrição da mecânica quântica, entrei mais diretamente em questões de terminologia. Neste contexto, eu adverti especialmente contra frases, muitas vezes encontradas na literatura física, como “*perturbação de fenômenos através da observação*” ou “*criação de atributos físicos para objetos atômicos através de medições*.” Essas frases, que podem servir para lembrar dos aparentes paradoxos na teoria quântica, são ao mesmo tempo capazes de causar confusão, uma vez que palavras como “*fenômenos*” e “*observações*”, assim como “*atributos*” e “*medições*”, são utilizados de forma pouco compatível com a linguagem comum e definição prática.⁹⁹

Esta rejeição seria logicamente acompanhada pela defesa de que o ato da medição seria um ato de *revelação* de valores *pré-existentes* do objeto medido sem que, no entanto, como observa Murdoch (1987; 1994, p. 312, ênfase nossa), “[...] tal *valor*

⁹⁹ No original: “[...] the discussion of the epistemological problems in atomic physics attracted as much attention as ever and, in commenting on Einstein’s views as regards the incompleteness of quantum-mechanical mode of description, I entered more directly on questions of terminology. In this connection, I warned especially against phrases, often found in the physical literature, such as “*disturbing of phenomena by observation*” or “*creating physical attributes to atomic objects by measurements*.” Such phrases, which may serve to remind of the apparent paradoxes in quantum theory, are at the same time apt to cause confusion, since words like “*phenomena*” and “*observations*,” just as “*attributes*” and “*measurements*,” are used in a way hardly compatible with common language and practical definition”.

pré-existente revelado seja um valor *absoluto*, mas uma *propriedade relativa ao arranjo experimental escolhido*”¹⁰⁰.

Por este motivo, Murdoch (1994, p. 312) classifica a atitude de Bohr em um *terreno médio*, entre a posição de Einstein (1949a, p. 667), segundo a qual uma medição *revela* de forma passiva valores *pré-existent*s de uma realidade física que existe de forma *totalmente independente* da medição, e a posição de Heisenberg (1983 [1927], p. 73), segundo a qual uma medição *cria* de forma ativa os valores de uma realidade física que *passa a existir* com o ato da medição. Dito de outra forma, segundo o raciocínio de Murdoch (1994, p. 312), a posição de Bohr poderia ser considerada como uma tese *semântica*, que estaria entre uma tese *epistemológica* (expressa por aquilo que chamaremos de *medição=revelação*) e uma tese *ontológica* (expressa pela *medição=criação*).

Da forma como a problemática foi delineada, a posição de Bohr estaria diretamente relacionada com os *limites da definibilidade* dos conceitos físicos, isto é, com o *significado* de tais conceitos. Na medida em que os *limites* ou *significados* seriam dados mediante a *experiência empírica*, Murdoch (1994, p. 313) aproxima tal posição a uma atitude *operacionista* ou *positivista*.

Uma *concepção operacionista de significado* estabelece que os termos denotando um conceito físico ou quantidade teórica tem *significado* nas operações experimentais utilizadas para medir tal conceito ou quantidade. Uma *concepção positivista de significado* estabelece que os termos utilizados para denotar um conceito físico ou quantidade teórica tem *valor de verdade* ou *valor cognitivo*, isto é, podem dizer que algo é *verdadeiro ou falso*, se e somente se tal valor de verdade pode ser confirmado por uma operação experimental. Ainda assim, a leitura *positivista* seria *confirmada* por Bohr¹⁰¹ (cf. Beller, Fine, 1994, p. 20; Murdoch, 1987, p. 140; 1994, p. 314-315) na ocasião

¹⁰⁰ No original: “[...] *the revealed pre-existing value, however, is not an absolute property of the object, but a property that is relative to the chosen experimental arrangement.*”

¹⁰¹ Archive for the History of Quantum Physics, Bohr Scientific Correspondence Niels Bohr Archive 19, Bohr para Frank, 14 de Janeiro de 1936.

de uma resposta a Phillip Frank¹⁰² (cf. Beller, Fine, 1994, p. 20) que, em uma carta, questiona se a interpretação de Bohr poderia ser aproximada à atitude *positivista*.

Murdoch (1994, p. 314) vai além e categoriza a concepção de significado de Bohr como *verificacionista*, na medida em que a atribuição do significado dos termos se dá mediante condições de *verificação* (em oposição às concepções segundo as quais as condições para *significado* ou *valor de verdade* seriam independentes da verificação experimental). De fato, são posições muito próximas. Segundo o raciocínio de Murdoch (1994, p. 314), o *positivismo* seria um subconjunto do *verificacionismo*, diferindo no fato de que o *último*, em um sentido mais amplo, iguala a noção de *significado* com a noção de *uso*, de modo que o *significado* de um termo deve ser suportado por condições de verdade cuja *verificabilidade* e *comunicabilidade* são possíveis. Por outro lado, a atitude *positivista* afirma que um termo cujo valor de verdade é impossível de ser determinado não é um termo que possa ser utilizado. Desta forma, Murdoch (1994, p. 314) identifica, na base *verificacionista* da posição de Bohr, uma atitude mais próxima ao *pragmatismo* ao invés de um empirismo radical, como o *positivismo*¹⁰³.

Assim, a rejeição de Bohr em relação ao referido *princípio da existência independente* parece ser *parcial*. Ao passo que não se pode designar uma operação experimental para determinar se *de fato* o estado físico de um objeto B *independe* do estado físico de um objeto A distante, a leitura *verificacionista* de Bohr parece indicar

¹⁰² Archive for the History of Quantum Physics, Bohr Scientific Correspondence Niels Bohr Archive 19, Frank to Bohr, 9 January 1936

¹⁰³ Sob tal perspectiva, Bohr consideraria, de acordo com Murdoch (1994, p. 317) a noção clássica de (A) *valores simultaneamente bem-definidos para posição e momento* uma idealização cujo significado pressupõe uma ação *virtualmente nula* do postulado quântico; da mesma forma, a noção de (B) *simultaneidade aplicada a fenômenos espacialmente separados* seria uma idealização cujo significado pressupõe uma velocidade infinita. Tais conceitos devem ser aplicados apenas em um conjunto de condições específicas: utiliza-se (A) quando os objetos são suficientemente grandes em relação à escala quântica de aproximadamente 10^{-33} cm dos *quanta* e (B) quando as distâncias são suficientemente pequenas em relação à velocidade de 299.792.458 m/s da luz. A visão verificacionista e pragmática de significado assumida por Bohr estaria, para Murdoch (1994, p. 317) implicada por trás de tal visão na medida em que os conceitos não são *revisados* (da forma como Einstein (1949b, p. 699) propusera em relação à formulação de *novos conceitos*), mas, antes, *re-significados*, isto é, restringidos a um escopo de aplicação (ainda) mais limitado. A contrapartida metodológica para esta atitude seria o *princípio da correspondência*, segundo o qual a física quântica seria uma *generalização* da física clássica.

que tal princípio parece ser *desprovido de significado*. No entanto, a afirmação da tese da *medição=revelação* parece sugerir que o princípio da existência independente não é totalmente negado.

Se esta leitura for correta, uma notável implicação ontológica do pensamento de Bohr no que se refere ao *comprometimento ontológico com uma realidade independente* parece emergir, isto é, uma leitura *realista* do pensamento desse autor seria possibilitada por esta leitura. Para Faye (1991, p. 198), as diversas definições e discussões acerca de uma definição para a concepção filosófica do *realismo* têm em comum dois pontos essenciais: “(1) o mundo existe independentemente de nossas mentes; e (2) a verdade é uma noção *não* epistêmica; isto é, uma proposição não é verdadeira porque é provável ou cognoscível”¹⁰⁴. Segundo Folse (1994, p. 128), Faye (1991, 1994, p. 98) defenderia uma interpretação de Bohr classificada como um *anti-realismo objetivo* na medida em que Bohr aceitaria (1) e rejeitaria (2):

[...] (1) *há um mundo objetivo e independente da mente*, mas (2) a verdade está relacionada com nossas faculdades cognitivas. Portanto, não é só o realismo que inclui entre os seus pressupostos a alegação de que operamos com um mundo independente da mente; o anti-realismo objetivo também o faz.¹⁰⁵ (FAYE 1991, p. 199, ênfase nossa)

O *anti-realismo* da leitura de Faye (1991, p. 199) emergiria da negação da *transcendência* das condições de verdade, isto é, da negação do *significado* de todas as afirmações *indecidíveis* (as afirmações sobre as quais não se possam verificar o valor de verdade mediante uma operação experimental) cujo alcance epistêmico está fora de qualquer possível sujeito cognoscente; em outras palavras, da negação de que o significado seja intrínseco ao objeto *em si mesmo*:

¹⁰⁴ No original: “(1) *the world exists independently of our minds; and (2) truth is a non-epistemic notion; that is, a proposition is not true because it is provable or knowable*”.

¹⁰⁵ No original: “[...] (1) *there is an objective, mind-independent world, but (2) truth is related to our cognitive powers. So it is not only realism which includes among its assumptions one making the claim that we operate with a mind-independent world; objective anti-realism does, too*”.

[Sentenças] decidíveis são aquelas que são ou determinadamente verdadeiras ou determinadamente falsas devido à nossa posse de meios cognitivos em princípio adequados ou evidências perceptuais pelas quais podemos verificar ou falsificá-las. Em outras palavras, tais sentenças têm condições de verdade cuja verificação é acessível. A classe complementar de declarações é aquela cujos membros são indecidíveis, portanto, não têm valores de verdade determinados, devido ao fato de que tais sentenças têm condições de verdade cuja verificação é transcendente. No entanto, em oposição ao anti-realista, o realista diria que até mesmo essas sentenças indecidíveis têm um valor de verdade determinado; o que acontece é que somos incapazes de descobrir qual. Assim, tanto o realista quanto o anti-realista objetivo operam com uma noção de objetividade.¹⁰⁶

Por outro lado, o termo “objetivo” da nomenclatura “anti-realismo *objetivo*” de Faye (1991) emerge como uma implicação de (1), na medida em que as afirmações *decidíveis* (as afirmações sobre as quais se possam verificar o valor de verdade mediante uma operação experimental) tenham suas condições de verdade garantidas pela realidade independente, por mais que o *sentido* de tal afirmação (como o estado de um objeto) seja *desconhecido* por qualquer possível sujeito cognoscente. Da forma como Folse (1994, p. 128-130) interpreta tal leitura, Faye (1991) não excluiria a possibilidade de que, para Bohr, um objeto não observado *possua de fato* valores bem definidos para suas propriedades físicas como, por exemplo, posição ou momento. No entanto, uma afirmação acerca dos valores simultaneamente bem definidos de tais propriedades não seria uma afirmação bem formulada na semântica da complementaridade e, portanto, seria sem sentido.

Contudo, deve ficar claro que, como observa Faye (1991, p. 208; 2008) em relação a (1), não há evidência textual que sustente a tese de que Bohr atribuiria valores *intrínsecos* às propriedades não observadas dos objetos quânticos. Quando Faye (1991, p. 200, ênfase nossa) menciona (1), parece fazê-lo enfatizando a

¹⁰⁶ No original: “*Idecidable [sentences] ones are those which are either determinately true or determinately false owing to our possession, in principle, of adequate cognitive means or perceptual evidence by which we might verify or falsify them. In other words, such sentences do have verification-accessible truth conditions. The complementary class of statements is one whose members are undecidable and thus do not have any determinate truth-values, owing to the fact that such sentences have verification-transcendent truth conditions. Yet, in opposition to the anti-realist, the realist would say that even these undecidable sentences have a determinate truth-value; it just happens that we are incapable of finding out which. Nevertheless, both the realist and the objective anti-realist operate with a notion of objectivity*”.

objetividade dos conceitos, em um campo *semântico*, quiçá *epistemológico*, mas, certamente, não *ontológico*.

O anti-realista objetivo, em relação às declarações sobre a realidade física, toma como ponto de partida as circunstâncias publicamente acessíveis ao especificar sua noção de verdade [...]. O anti-realismo objetivo é, então, a posição que sustenta que a verdade é um conceito que se relaciona com circunstâncias cuja ocorrência ou não-ocorrência é, em princípio, empiricamente acessível às nossas capacidades cognitivas.¹⁰⁷

A visão sobre (1), em relação ao pensamento de Bohr, é compartilhada por Folse (1994, p. 128). Por mais que Faye (cf. 1991, p. 204) e Folse (cf. 1994, p. 128) concordem com a visão de que Bohr ocuparia um *terreno médio* entre os dois extremos do idealismo e do realismo – o que também coaduna com a leitura de Murdoch (1994, p. 312) –, Folse (1985; 1994) defende uma leitura *realista* do pensamento de Bohr. Folse (1994, pp. 128-131) argumenta que o ponto (2) não seria *tão decisivo* quanto o ponto (1) na medida em que o *comprometimento ontológico com uma realidade independente* seria mais fundamental do que uma tese *epistemológica*, relativa ao domínio do significado dos conceitos utilizados mediante nosso conhecimento. Em outras palavras, Folse (1994) considera que a aceitação de (1) seria suficiente para uma interpretação *realista* do pensamento de Bohr, tendo em vista o *comprometimento ontológico com a existência de uma realidade independente*.

No entanto, Faye (1991, p. 207-211) expõe sérias restrições à interpretação realista de Folse (1985, 1994), das quais sublinharemos apenas uma. Quando Folse (1985, p. 238, 257) afirma que a interação de um objeto com os instrumentos de medição *produz* ou *causa* o fenômeno, acaba por admitir a ocorrência da tese da *medição=criação* (cf. Faye, 1991, p. 207) – uma implicação que, como vimos é rejeitada por Bohr. Além disso, tal ocorrência parece ser incompatível com o comprometimento ontológico com uma realidade independente, isto é, a atribuição

¹⁰⁷ No original: “The objective antirealist with respect to statements about physical reality takes, as his point of departure, publicly accessible circumstances when specifying his notion of truth [...]. Objective antirealism is, then, the position which holds that truth is a concept which relates to circumstances whose occurrence or non-occurrence is, in principle, empirically accessible to our cognitive capacities [...]”.

de um poder criador ou causal poderia ao ato da medição parece ser irreconciliável com a afirmação de que tais propriedades, *criadas, já estavam lá*. Por fim, se a tese de Folse (1985, 1994) for correta, então deve haver alguma *evidência textual* – o que não há (cf. Faye, 1991, p. 208) – em que Bohr assume que objetos atômicos possuam intrinsecamente propriedades bem definidas, mas que, no entanto, não podem ser verificadas empiricamente dado que uma operação experimental não é capaz de revelar aquilo que está *por trás do fenômeno*.

O fato de que Bohr acreditava que os objetos quânticos seriam *reais* é consensual, mas, segundo Faye (2008) ainda há muito debate na literatura das últimas décadas a respeito do *tipo de realidade* que eles têm, isto é, se são ou não algo diferente e para além da observação, de modo que tal questão permanece aberta.

De acordo com Jammer, (cf. 1974, p. 207) Bohr evitaria o comprometimento com as teses *realistas* e com as teses *idealistas* através do *princípio da correspondência*, isto é, pela afirmação de que um objeto (tal como o *aparelho medidor*) é considerado como um objeto *clássico* em um determinado conjunto de circunstâncias, a saber, para os propósitos da medição. No entanto, tal afirmação acaba por esbarrar em outro problema, talvez ainda mais sério. De acordo com Faye (1991, p. 139), a separabilidade assumida, para o ato da medição, seria *parcialmente arbitrária*. Para que se possa dizer que *ocorreu uma medição*, o objeto medido não pode ser parte da agência de medição, ou seja, é necessária uma distinção entre duas entidades de modo que, para fins *práticos*, *um instrumento de medição é um instrumento de medição*, e *um objeto é um objeto*; se a separação é assumida, sua interação é, do ponto de vista do *ato da medição*, indeterminada, pois “[...] a interação só pode ser determinada *se o aparelho de medição for considerado simultaneamente como um aparelho e como um objeto*, o que é logicamente impossível”¹⁰⁸ (FAYE, 1991, p. 139, ênfase nossa).

O que daria o tom de arbitrariedade na distinção proposta seria o ponto de *demarcação da separabilidade*, que pode ser dado, de acordo com Faye (1991, p. 140):

¹⁰⁸ No original: “[...] the interaction can only be determined if the measuring device is considered simultaneously as an instrument and an object, which is logically impossible”.

[...] tanto entre o objeto observado, consistindo somente no objeto microscópico e no instrumento, ou entre um objeto observado que consiste no objeto microscópico juntamente com um instrumento, ou uma parte de um e ainda um outro instrumento.¹⁰⁹

Tal arbitrariedade seria conhecida por Bohr (1983, p. 89, ênfase nossa) desde o primeiro artigo em que expõe a *complementaridade*, onde afirma que:

[...] o conceito de observação é arbitrário pois depende de quais objetos são incluídos no sistema para ser observado. [...] [E]m qual ponto o conceito de observação – envolvendo o postulado quântico, com a sua “irracionalidade” inerente – deve ser utilizado é uma questão de conveniência.¹¹⁰

A “questão de conveniência” do critério de demarcação para a separabilidade do processo de medição foi tida como a resposta de Bohr frente ao *problema da medição*, que discutiremos no próximo capítulo – solução esta, criticada por diversos pensadores da época.

Heisenberg (1979, p. 410-414) argumentou que, como a *linha de demarcação* – ou, da forma como Camilleri (2007, p. 523) traduz o termo “*Schnitt*”, originalmente em alemão, para a palavra inglesa “*cut*”, que traduzido para o português significa “*corte*” – *entre o objeto quântico a ser investigado, representado matematicamente por uma função de onda, e o instrumento de medição, descrito por meio de conceitos clássicos, seria arbitrária, então todos os sistemas (incluindo o instrumento de medição) deveriam ser considerados sistemas quânticos, isto é, as leis quânticas deveriam se aplicar de forma irrestrita.*

Sob a mesma linha de raciocínio, o físico Johann von Neumann (1955 [1932]) elaborou uma concepção de medição quântica a partir do formalismo da teoria

¹⁰⁹ No original: “What is arbitrary, then, is that the demarcation may be made either between the observed object, consisting only of the microscopical object, and the instrument, or between an observed object consisting of the microscopical object along with an instrument, or a part of one, and a further instrument”.

¹¹⁰ No original: “[...] the concept of observation is in so far arbitrary as it depends upon which objects are included in the system to be observed. [...] it is a question of convenience at which point the concept of observation involving the quantum postulate with its inherent ‘irracionalidade’ is brought in”.

segundo a qual todos os sistemas físicos têm um tratamento quântico. Diferentemente de Bohr e Einstein, von Neumann (1955 [1932]) formulou uma teoria formal da medição, na qual o problema da medição aparece de forma mais clara e distinta, que analisaremos no próximo capítulo. Para nos aprofundarmos na teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), devemos fazer algumas considerações gerais sobre a teoria medição em mecânica quântica – que também será o assunto do próximo capítulo.

Procuramos enfatizar nesta seção os aspectos filosóficos do debate em relação à medição na mecânica quântica, através da discussão entre dois autores com pontos de vista diametralmente opostos, a saber, Bohr, defensor da interpretação de Copenhague, e Einstein, um dos grandes críticos de tal interpretação. Procuramos expor também os pressupostos *ontológicos* aos quais o pensamento de Bohr e Einstein se referem, a fim de melhor compreender suas propostas para a interpretação da mecânica quântica. É essencialmente com o referencial filosófico apresentado aqui que Einstein propõe uma interpretação *estatística* para a mecânica quântica, que também trataremos rapidamente no capítulo seguinte.

3. O PROBLEMA DA MEDIÇÃO

O problema da medição (*measurement problem*) na mecânica quântica tem sua gênese nas primeiras discussões em torno da *interpretação de Copenhagen*, na medida em que a posição geral de Bohr seria que as propriedades físicas dos objetos quânticos dependeriam fundamentalmente das condições experimentais, isto é, de *medição*, efetuadas sobre tais objetos (cf. Krips, 2013) – posicionamento que aparece explicitamente no debate suscitado por EPR (1983 [1935]; cf. Bohr, 1983 [1935]).

De acordo com Jammer (1974, p. 473), a concepção ortodoxa de medição envolve os objetos a serem medidos e os instrumentos *macroscópicos* de medição que, embora necessários para que uma medição seja realizada, “[...] não são explicados pela teoria quântica em si mesma, mas considerados como logicamente anteriores à teoria”¹¹¹. Assim, na visão de Bohr, não existiria a necessidade de uma *teoria da medição quântica* na medida em que a assunção do *princípio da correspondência* supostamente permitiria uma interpretação da mecânica quântica que deliberadamente *se afastaria* do *problema da medição*.

Ainda que o princípio da correspondência de Bohr não possa ser substituído por uma teoria formalizada da medição, o tratamento *duplo* em relação ao processo de medição seria, como salienta Jammer (1974, p. 472, ênfase nossa), uma das características mais *obscuras* da interpretação de Bohr, especificamente no que se refere à *arbitrariedade* da classificação dos domínios clássico e quântico. Ademais, identificamos ao longo deste estudo alguns aspectos do *problema da medição* na interpretação de Bohr (1983 [1928], p. 89, 103; 1934, p. 11; Jammer, 1974, p. 98).

A medição seria, da forma como ressalta Gibbins (1987, p. 104), um dos conceitos *centrais* em mecânica quântica. Jammer (1974, p. 471) vai além e considera a medição um conceito central na teoria quântica *a despeito* da interpretação escolhida, uma vez que corresponde à ligação entre a *teoria* e a *experiência*.

¹¹¹ No original: “[...] are not accounted for by quantum theory itself but regarded as logically preceding the theory”.

Como procuramos enfatizar até aqui, o conceito de *medição* se relaciona com *todos* os aspectos filosóficos problemáticos da mecânica quântica expostos neste trabalho. Gibbins (1987, p. 104) considera que a medição é um aspecto ligado à maioria – quiçá de todos – os paradoxos da mecânica quântica. No primeiro capítulo, apresentamos a discussão filosófica suscitada pela *medição* das propriedades observáveis – posição e momento – de um objeto quântico. Da mesma forma, no segundo capítulo procuramos apresentar o debate filosófico que emerge dos efeitos da *medição* de um objeto A em um objeto espacialmente distante B. Assim, conforme procuramos apresentar até aqui, parece razoavelmente justificada a posição de Gibbins (1987, p. 104, ênfase nossa) de que “[...] o problema da medição é o *problema central* da filosofia da mecânica quântica”¹¹².

Neste capítulo, analisaremos em detalhe a noção de *medição* em mecânica quântica, bem como o *problema da medição quântica*. Para tanto, iniciaremos a investigação pontuando as diferenças entre a física clássica e a física quântica em relação ao conceito de medição. Em seguida, analisaremos a formulação da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]) e suas extensões ontológicas. Ao final do capítulo, pontuaremos algumas atitudes alternativas às formulações apresentadas ao longo deste estudo.

3.1 O conceito de “*medição*” nas físicas clássica e quântica

Muito embora a física tenha sido considerada a *ciência da medição* por Norman Campbell (1928), Jammer (1974, p. 471) afirma que haveria pouco interesse, por parte dos físicos, anteriormente ao advento da mecânica quântica, em explorar mais profundamente o conceito de medição. Para Gibbins (1987, p. 102), isso ocorre pois a descrição do processo de medição é um procedimento pouco problemático na física clássica.

¹¹² No original: “[...] *the problem of measurement is the central problem of the philosophy of quantum mechanics*”.

A noção *clássica* de medição (bem como sua representação matemática) envolveria, de acordo com Jammer (1974, p. 471), dois processos, sendo um *físico* e um *psicofísico*: o processo físico denota uma interação que chamaremos I_1 entre um objeto que chamaremos X a ser observado (tal como um corpo maciço ou uma corrente elétrica) e um instrumento de medição que chamaremos M (tal como uma balança ou um amperímetro), de modo que $(I_{X \leftrightarrow M})$; o processo psicofísico denota uma interação que chamaremos I_2 entre M e um observador que chamaremos O (seus órgãos dos sentidos e, em última análise, sua *consciência*¹¹³).

Se aceitarmos a definição do processo *físico* como $(I_{X \leftrightarrow M})$, devemos aceitar, por consequência lógica, uma ação do objeto sobre o instrumento de medição de forma $(I_{X \rightarrow M})$ e, ao mesmo tempo, uma ação do aparelho medidor sobre o objeto de forma $(I_{M \rightarrow X})$. No entanto, a ordem de magnitude da ação $(I_{M \rightarrow X})$ seria tão menor do que a ação de $(I_{X \rightarrow M})$, a ponto de ser considerada como *eliminável* na interação I_1 . O aspecto *psicofísico* da medição clássica também seria abandonado sob a alegação de que a relação entre M e O estaria *fora dos domínios* de uma teoria física.

A ação do objeto no instrumento de medição, no entanto, não poderia ser negligenciada na medida em que o resultado M , tal como a ponteiro de uma balança indicando um valor y , deve depender de X , de modo que a *medição clássica* seria, de acordo com Jammer (1994, p. 471-472), reduzida à ação $(I_{X \rightarrow M})$. Dito de outro modo, como sugere Gibbins (1987, p. 102), a interação $(M \rightarrow X)$ pode ser arbitrariamente pequena, o que sugere que a medição clássica pode ser descrita com uma precisão arbitrariamente grande. Tal atitude permitiria à física clássica o fornecimento de uma abordagem *inteiramente objetiva* no tratamento dos processos físicos, isto é, *considerá-*

¹¹³ À primeira vista, tal afirmação parece estranha na medida em que, da forma como Jammer (1974, p. 471) generaliza a noção de *física clássica*, a realidade física *clássica* seria composta por entidades desprovidas de qualidades sensoriais, isto é, de corpos extensos e seu movimento no espaço, ou seja, não haveria *espaço* para a introdução da *consciência humana* como uma parte fundamental na teoria; no entanto, na medida em que a teoria clássica adquire *validade* através da *testabilidade de suas predições*, a introdução desse conceito parece ser mais plausível visto que uma operação tal como um *teste* deve envolver, em última análise, a consciência humana, o que “*parecia envolver, conseqüentemente, problemas ontológicos e epistemológicos relativos à relação entre objetos físicos, por um lado, e, por outro lado, à consciência humana*”; no original: “*Consequently, ontological and epistemological problems concerning the relationship between physical objects, on the one hand, and human consciousness, on the other, seemed to be involved*”.

los de forma independente da medição e, conseqüentemente, eliminar da teoria o papel da consciência do observador implícito em I_2 .

Com o advento da mecânica quântica, mais precisamente com o *postulado quântico*, que prevê a necessidade da interação *finita* (isto é, de *ao menos um quantum*) entre M e X , a magnitude da ação ($I_{M \rightarrow X}$) seria *igualmente relevante* à ação ($I_{X \rightarrow M}$). Como consequência, de acordo com Jammer (1974, p. 472), a condição para a consistência da concepção *clássica* de medição não seria mais aplicável uma vez que o projeto clássico de uma abordagem *independente da medição* é inviável na mecânica quântica, isto é, não se pode atribuir à interação ($M \rightarrow X$) uma grandeza arbitrariamente pequena – o que é, como vimos, *uma das vias* para se chegar ao *princípio de indeterminação*.

Um dos aspectos menos problemáticos da medição quântica seria, de acordo com Gibbins (1987, pp. 104-105), a *produção de um resultado macroscópico, determinado*, fruto da interação I_1 . É um problema que se relaciona com a *axiomática* da teoria quântica, isto é, com o formalismo matemático da teoria, por isso, dado o escopo teórico desse trabalho, não será abordado aqui. Outro aspecto bastante problemático, destacado por Jammer (1974, p. 474, ênfase nossa), seria um problema *metafísico* advindo do fato de que, enquanto não houver a interação I_1 , nenhum evento pode ser considerado *atual*, mas tão-somente *potencial*; dito de outro modo, “[...] se todo o universo físico fosse composto apenas por entidades microfísicas, como deveria ser de acordo com a teoria atômica, seria um universo do movimento de *possibilidades* [...] mas nenhum evento *real*”¹¹⁴.

O reconhecimento de tais problemas deu importância à formulação de teorias próprias da medição, que antes eram relegadas a um plano puramente formal de consistência interna da teoria. Explicitados esses pontos, os quais serão melhor tratados em seguida, passemos à análise da teoria da medição de von Neumann.

¹¹⁴ No original: “[...] if the whole physical universe were composed only of microphysical entities, as it should be according to the atomic theory, it would be a universe of devolving potentialities [...] but no real events”.

3.2 A teoria da medição de von Neumann

De acordo com Jammer (1974, p. 474), a teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]) se assemelha à interpretação de Copenhague na medida em que atribui um papel fundamental à *descontinuidade* presente no ato da medição, mas, de forma contrária a Bohr, *considera o instrumento de medição M um sistema quântico-mecânico*. O raciocínio de von Neumann (1955 [1932]) fornece, para Gibins (1987, p. 109), as condições necessárias para a formulação de uma *teoria da medição* em mecânica quântica, sendo a base conceitual para diversas outras teorias da medição.

O ponto de partida de von Neumann seria, de acordo com Jammer (1974, p. 475), a assunção de que existem *dois tipos de processos ou mudanças dos estados quânticos*: o processo 1 (ou processo do *primeiro tipo*), chamado de “mudanças arbitrárias por medição”¹¹⁵, e o processo 2 (ou processo do *segundo tipo*), chamado de “mudanças automáticas”¹¹⁶ (cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 351). O processo 1 é enunciado como “o ato descontínuo, não causal e instantâneo de experimentos ou medições”¹¹⁷(cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 349); o processo 2 é enunciado como a “mudança causal e contínua no curso do tempo”¹¹⁸ (cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 351). Ao passo que o processo 2 é descrito pelas leis de movimento da mecânica quântica (frequentemente derivada através de uma equação diferencial, temporal e determinística, chamada “equação de Schödinger”), o processo 1 não o é (cf. Jammer, 1974, p. 476). Na teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), o processo 1 é irreduzível, e, portanto, não pode ser reduzido ao processo 2.

A maneira como von Neumann (1955 [1932], pp. 349-351) enuncia os dois processos ilustra, de acordo com Henry Krips (2013), o *conflito* entre dois importantes axiomas da teoria quântica: o *princípio do colapso* (ou *redução*) *da função de onda*, expressa pelo processo 1, e a *equação linear de movimento* (chamada “*equação de*

¹¹⁵ No original: “*arbitrary changes by measurement*”.

¹¹⁶ No original: “*automatic changes*”.

¹¹⁷ No original: “*the discontinuous, non-causal and instantaneously acting experiments or measurements*”.

¹¹⁸ No original: “*continuous and causal changes in course of time*”.

Schrödinger”), expressa pelo processo 2. Da forma como o filósofo David Albert (1992, p. 79) coloca a questão,

A [lei] dinâmica [processo 2] e o postulado do colapso [processo 1] estão categoricamente em contradição um com o outro [...] o postulado do colapso parece estar certo sobre o que acontece quando fazemos medições, e a dinâmica parece estar estranhamente *errada* sobre o que acontece quando fazemos medições; ainda, a dinâmica parece estar *certa* sobre o que acontece quando *não estamos* fazendo medições; e assim a coisa toda é muito confusa; e o problema de o que fazer com tudo isso veio a ser chamado de “o problema da medição”.¹¹⁹

Ainda que o formalismo da mecânica quântica represente informações *probabilísticas* acerca dos sistemas físicos, o processo 2, através da equação de Schrödinger, é, ao mesmo tempo: *determinista*, no sentido em que, de acordo com Breuer (2001, p. 78), para cada instante do tempo, existe somente um estado possível; *linear*, no sentido em que determina a evolução de um sistema a partir de um valor temporal fixado, fornecendo uma distribuição linear da probabilidade de tal evolução para qualquer outro valor temporal; e *reversível*, pois o valor temporal pode ser tanto negativo (isto é, se referindo ao *passado*) quanto positivo (isto é, se referindo ao *futuro*). Dito de outro modo, o processo 2 permite afirmar a *probabilidade* de encontrar um elétron em determinada região espacial após um intervalo de tempo qualquer.

Enquanto o processo 2 envolve uma evolução contínua e determinista, o processo 1, ao contrário, envolve uma descontinuidade indeterminista e irreversível, de acordo com Krips (2013). O processo 1 descreve a *transformação do estado de um sistema físico* após o ato da medição, isto é, *transforma* o estado inicial de tal sistema (descrito pelo processo 2) em um estado *inteiramente novo, não previsível* pelas leis dinâmicas de movimento especificadas pelo processo 2. Isto é notável, pois ao passo

¹¹⁹ No original: “The dynamics and the postulate of collapse are flatly in contradiction with one another [...] the postulate of collapse seems to be right about what happens when we make measurements, and the dynamics seems to be bizarrely wrong about what happens when we make measurements, and yet the dynamics seems to be right about what happens whenever we aren’t making measurements; and so the whole thing is very confusing; and the problem of what to do about all this has come to be called ‘the problem of measurement’”.

que o processo 2 afirma que o *estado final* do sistema quântico em questão seja *indeterminado* em relação às suas *propriedades* calculáveis pela equação de movimento, o processo 1 afirma um valor *determinado* para tal estado final, registrado pelo ato da medição.

O problema da medição pode ser delineado precisamente no embate entre os dois axiomas fundamentais da teoria quântica, sendo que a tentativa de reconciliar os dois processos seria, de acordo com Jammer (1974, p. 476), o problema central das teorias posteriores da medição. Os dois processos seriam, para von Neumann, 1955 [1932], p. 417) uma “peculiar natureza dual do procedimento da mecânica quântica”¹²⁰, considerando-os *indispensáveis* para a teoria da medição:

[...] a mecânica quântica descreve os eventos que ocorrem nas partes observadas do mundo – contanto que elas não interajam com a parte observante – com o auxílio do processo 2; mas assim que uma interação ocorre, isto é, uma medição, é requerido a aplicação do processo 1.¹²¹ (VON NEUMANN, 1955 [1932], p. 420).

A análise de von Neumann (1955 [1932]) acerca do processo de medição é dividida por Jammer (1974, p. 477) em duas etapas, correspondendo respectivamente a *I*₁ e *I*₂: (I) a interação entre o objeto e o aparato de medição e (II) o ato da medição.

Sobre a etapa (I), é suficiente dizer que a mecânica quântica considera a união <objeto + aparato> um *único* sistema, chamado sistema *composto*. Tal sistema seria considerado, anteriormente ao passo (II), um sistema *isolado* e, por isso, considerado um *estado puro* (cf. Jammer, 1974, p. 479). Assim, von Neumann (1955 [1932]) parece indicar que o *sistema composto* não seria suficiente para inferir o valor do objeto *O*, isto é, sugere que o *sistema composto obtido por I*₁ não seria suficiente para *completar uma medição*. Se todos os objetos materiais (microscópicos ou macroscópicos) são constituídos por objetos quânticos, então a interação entre um objeto quântico (a ser

¹²⁰ No original: “peculiar dual nature of the quantum mechanical procedure”.

¹²¹ No original: “[...] quantum mechanics describes the events which occur in the observed portions of the world, so long as they do not interact with the observing portion, with the aid of the process 2, but as soon as such an interaction occurs, i.e., a measurement, it requires the application of process 1”.

medido) e um aparelho de amplificação (a *supostamente medir*) não completaria uma medição, mas ficaria atrelada ao processo 2.

Poder-se-ia sugerir que ao aparato M fosse acoplado um *segundo aparato de medição* M' , na intenção de *completar uma medição no sistema composto*. Essa proposta, no entanto, levaria a uma regressão *ad infinitum* de aparatos medidores na medida em que M' se relacionaria com M da mesma maneira que M se relaciona com X no caso do sistema composto $\langle \text{objeto} + \text{aparato} \rangle$, isto é, não conseguiria completar uma medição.

Esse aspecto problemático da teoria da medição de von Neumann ficaria conhecido posteriormente como a “cadeia de von Neumann” (*von Neumann's chain*), e é exemplificada por Breuer (2001, p. 80, ênfase nossa) com bastante clareza na passagem que destacamos a seguir:

Se um observador A faz uma medição num sistema S , os valores do ponteiro observável serão relacionados com os valores da medida observável. Conhecendo o valor do ponteiro sabemos o valor do observável medido. Mas se a equação de Schrödinger é válida para a medição da interação e o observável medido não tinha um valor bem definido antes da medição, o ponteiro observável não terá um valor definido posteriormente. Agora, um segundo observador A_2 pode tentar medir o valor do ponteiro observável. Mas esta medição realizada por A_2 em A enfrenta o mesmo problema: o valor do segundo ponteiro observável pode ser relacionado com o do primeiro e, portanto, com aquele do observável medido; mas se o primeiro ponteiro não tinha um valor bem definido, o segundo também não terá. O mesmo será o caso se um terceiro observador A_3 tentar determinar o valor do segundo ponteiro, etc., etc.¹²²

Há de ficar claro que tal regressão infinita é uma dificuldade filosófica bastante séria para uma teoria, sendo um dos célebres paradoxos clássicos, conhecido

¹²² No original: “If an observer A makes a measurement on a system O the values of the pointer observable will be related to the values of the measured observable. Knowing the value of the pointer we know the value of the measured observable. But if the Schrödinger equation holds for the measurement interaction and the measured observable did not have a well-defined value before the measurement, the pointer observable will not have a well-defined value afterwards. Now a second observer A_2 can try to measure the value of the pointer observable. But this measurement performed by A_2 on A faces the same problem: the value of the second pointer observable can be related to that of the first and thus to that of the measured observable, but if the first pointer did not have a well-defined value the second will not have either. The same will be true if a third observer A_3 tries to determine the value of the second pointer, etc., etc.”.

através do termo em latim “*reductio ad infinitum*”. Assim, o ato da medição *deve* ser uma *operação finita* (cf. Jammer, 1974, p. 479), o que seria possível, ao que parece, somente por um *ato de observação* (II), em *M*, em “[...] um ato descontínuo, não causal e instantâneo”¹²³, isto é, correspondente ao processo 1. A questão ontológica (O2) dessa discussão reside justamente nas respostas para a questão de *onde* e *como* o referido “ato” do processo 1 acontece: von Neumann (1955 [1932], pp. 418-420, ênfase nossa) afirma, em um longo parágrafo (que reproduziremos integralmente), que o ato da medição seria causado pela *percepção do observador*:

Primeiro, é inerentemente e totalmente correto que *a medição ou o processo relacionado à percepção subjetiva é uma nova entidade em relação ao ambiente físico e não é redutível a ele* – de fato, a percepção subjetiva nos leva para *a vida intelectual interior do indivíduo*, que é extra observável por sua própria natureza (já que deve ser assumida por qualquer observação ou experimento concebível). (Ver a discussão acima [precisamente a mesma que conduzimos nos parágrafos acima]). No entanto, é uma exigência fundamental do ponto de vista científico – o chamado princípio do paralelismo psico-físico – que deva ser possível descrever o processo extra físico da percepção subjetiva como se ele fosse pertencente, na realidade, ao mundo físico – isto é, atribuir às suas partes processos físicos equivalentes no ambiente objetivo, no espaço comum. (É claro que nesse processo relacionando surge a freqüente necessidade de localizar alguns desses processos em pontos situados dentro da porção do espaço ocupada pelos nossos próprios corpos. Mas isso não altera o fato de que eles pertençam ao “mundo sobre nós”, o ambiente objetivo referido anteriormente.) Num exemplo simples, estes conceitos podem ser aplicados do seguinte modo: Desejamos para medir uma temperatura. Se quisermos, podemos prosseguir com este processo numericamente até que tenhamos a temperatura do ambiente do recipiente de mercúrio através do termómetro, e então dizer: esta temperatura foi medida pelo termómetro. Mas podemos levar o cálculo adiante e, a partir das propriedades do mercúrio, que podem ser explicadas em termos cinéticos e moleculares, podemos calcular seu aquecimento, expansão, e o comprimento resultante da coluna de mercúrio, e em seguida dizer: este é o comprimento visto pelo observador. Indo ainda mais longe, e levando a fonte de luz em consideração, nós poderíamos encontrar o reflexo do quanta de luz sobre a coluna opaca de mercúrio, e o caminho do *quanta* de luz remanescente até o olho do observador, sua refração na lente do olho, e a formação uma imagem sobre a retina, e em seguida nós diríamos: esta imagem é registada pela retina do observador. E se o nosso conhecimento fisiológico fosse mais preciso do que é hoje, poderíamos ir ainda mais longe, traçando as reações químicas que produzem a impressão desta imagem na retina, no nervo ótico e no cérebro, e então, no final, dizer: essas mudanças

¹²³ No original: “[...] *a discontinuous, noncausal, and instantaneous act*”.

químicas de suas células cerebrais são percebidas pelo observador. *Mas em qualquer caso, não importa o quão longe calcularmos – do recipiente de mercúrio, com a escala do termômetro, para a retina, ou no cérebro – em algum momento devemos dizer: “e isso é percebido pelo observador”. Ou seja, devemos sempre dividir o mundo em duas partes, uma sendo o sistema observado e a outra sendo o observador.* No primeiro caso, podemos acompanhar todos os processos físicos (pelo menos a princípio) com uma precisão arbitrariamente grande. No último caso, isso é insignificante. A fronteira entre os dois é bastante arbitrária. Em particular, vimos nas quatro possibilidades diferentes do exemplo acima que o observador, nesse sentido, não deve ser identificado com o corpo do observador real: num dos casos do exemplo acima, incluímos até mesmo o termômetro, enquanto em outro exemplo, até mesmo os olhos e as vias do nervo óptico não foram incluídos. Levar esse limite profundamente de forma arbitrária para o interior do corpo do observador é o teor real do princípio do paralelismo psico-físico – mas isso não altera o fato de que *em cada método da descrição a fronteira deva ser colocada em algum lugar, se não for para o método continuar vagamente, isto é, se uma comparação com a experiência deve ser possível. De fato a experiência só faz declarações deste tipo: um observador realizou certa observação (subjéctiva); e nunca alguma como esta: uma grandeza física tem um determinado valor.*¹²⁴

¹²⁴ No original: “First, it is inherently entirely correct that the measurement or the related process of the subjective perception is a new entity relative to the physical environment and is not reducible to the latter. Indeed, subjective perception leads us into the intellectual inner life of the individual, which is extra-observational by its very nature (since it must be taken for granted by any conceivable observation or experiment). (Cf. the discussion above.) Nevertheless, it is a fundamental requirement of the scientific viewpoint – the so-called principle of the psycho-physical parallelism – that it must be possible so to describe the extra-physical process of the subjective perception as if it were in reality in the physical world – i.e., to assign to its parts equivalent physical processes in the objective environment, in ordinary space. (Of course, in this correlating procedure there arises the frequent necessity of localizing some of these processes at points which lie within the portion of space occupied by our own bodies. But this does not alter the fact of their belonging to the “world about us,” the objective environment referred to above.) In a simple example, these concepts might be applied about as follows: We wish to measure a temperature. If we want, we can pursue this process numerically until we have the temperature of the environment of the mercury container of the thermometer, and then say: this temperature is measured by the thermometer. But we can carry the calculation further, and from the properties of the mercury, which can be explained in kinetic and molecular terms, we can calculate its heating, expansion, and the resultant length of the mercury column, and then say: this length is seen by the observer. Going still further, and taking the light source into consideration, we could find out the reflection of the light quanta on the opaque mercury column, and the path of the remaining light quanta into the eye of the observer, their refraction in the eye lens, and the formation of an image on the retina, and then we would say: this image is registered by the retina of the observer. And were our physiological knowledge more precise than it is today, we could go still further, tracing the chemical reactions which produce the impression of this image on the retina, in the optic nerve tract and in the brain, and then in the end say: these chemical changes of his brain cells are perceived by the observer. But in any case, no matter how far we calculate – to the mercury vessel, to the scale of the thermometer, to the retina, or into the brain, at some time we must say: and this is perceived by the observer. That is, we must always divide the world into two parts, the one being the observed system, the other the observer. In the former, we can follow up all physical processes (in principle at least) arbitrarily precisely. In the latter, this is meaningless. The boundary between the two is arbitrary to a very large extent. In particular we saw in the four different possibilities in the example above, that the observer in this sense needs not to become identified with the body of the actual observer: in one instance in the above example, we included even the thermometer in it, while in another instance, even the eyes and optic nerve tract were not included. That this

Embora von Neumann não tenha mencionado a palavra “consciência”, parece ser unânime, dentre as diversas leituras desta famosa passagem, que von Neumann (cf. 1955 [1932], p. 420) se refere à “consciência do observador”¹²⁵ quando enuncia o poder causal da “percepção subjetiva do observador”. Em outra passagem, enuncia o observador como um “abstract ego” (cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 421) que, traduzido livremente para o português, significa um “ego abstrato”, isto é, um “eu”, uma subjetividade abstrata. Assim, para von Neumann (1955 [1932], pp. 418-421), somente algo *fora* do sistema composto por $(X \wedge M)$ – tal como a *consciência do observador* O – poderia dar cabo à tal cadeia de redução infinita, reintroduzindo a interação psicofísica I_2 na teoria da medição.

A fim de discutir tal situação, von Neumann (1955 [1932], p. 421) divide o universo de discurso em 3 partes correspondentes à notação I, II e III, de modo que “I” corresponde ao objeto (ou sistema) a ser observado, “II” corresponde ao instrumento de medição e “III” ao *observador*, isto é, seu *ego abstrato*. Em todos os casos, o resultado da medição em I efetuada por II+III é o mesmo do que a medição em I+II efetuada por III. No primeiro caso, o processo 2 se aplica a I, e, no segundo caso, o processo 2 se aplica a I+II. Em todos os casos, o processo 2 não se aplica a III,

boundary can be pushed arbitrarily deeply into the interior of the body of the actual observer is the content of the principle of the psycho-physical parallelism – but this does not change the fact that in each method of description the boundary must be put somewhere, if the method is not to proceed vacuously, i.e., if a comparison with experiment is to be possible. Indeed experience only makes statements of this type: an observer has made a certain (subjective) observation; and never any like this: a physical quantity has a certain value”.

¹²⁵ A principal motivação histórica para esta interpretação, de acordo com Jammer (1974, p. 480), seria uma série de longas conversas que von Neumann (cf. 1955 [1932], nota 208) mantinha com Leó Szilárd, que teria publicado um *estudo influente* (cf. Szilárd, 1983 [1929]) sobre a *intervenção de um ser inteligente em um sistema termodinâmico*. O estudo de Szilárd (1983 [1929]) teria, para Jammer (1974, p. 480), “[...] marcou o início de especulações instigantes sobre o efeito de uma intervenção física da mente sobre a matéria e, assim, abriu o caminho para a afirmação de longo alcance de von Neumann, sobre a impossibilidade de formular uma teoria completa e consistente de medição mecânica quântica sem referência à consciência humana”; no original: “[...] marked the beginning of certain thought-provoking speculations about the effect of a physical intervention of mind on matter and thus paved the way toward von Neumann’s far-reaching contention that it is impossible to formulate a complete and consistent theory of quantum mechanical measurement without reference to human consciousness”.

isto é, III é a única parte para qual o processo 1 se aplica em todos os casos (cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 421; Breuer, 2001, p. 78).

Portanto, na teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), o observador (isto é, aquilo que *de fato completa* a medição) não obedece as mesmas leis que os sistemas observados. Pela sentença com um valor de verdade tal como “completar uma medição”, queremos dizer um evento, cuja probabilidade que chamaremos “P” de resultado de que chamaremos “R” seja, exclusivamente, ao menos um dos dois resultados possíveis, que chamaremos “s” e “s’”, onde a probabilidade dos dois resultados possíveis seja equivalente, de modo que $R(s) = R(s')$. O processo 1 indica que o estado de R é (por exemplo) *s'* (e, conseqüentemente, *não-s*). Neste preciso sentido, o observador deve estar *fora* dos limites da física. Dito de outro modo, da mesma forma que para Bohr, para von Neumann (1955 [1932], p. 418) *o agente causal da medição*, isto é, aquilo que *completa uma medição*, está *para além dos limites da física quântica*¹²⁶:

[...] É inerentemente inteiramente correto que a medição ou o processo relacionado à percepção subjetiva seja uma nova entidade em relação ao ambiente físico e não pode ser reduzido a este último. De fato, a percepção subjetiva nos leva para a vida interior intelectual do indivíduo que é extra observacional, por sua própria natureza.¹²⁷

Desta forma, por mais que a teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]) incorra na mesma dificuldade de Bohr, no que tange a *arbitrariedade* da separação entre o que é e o que não é domínio da mecânica quântica, seu ganho é de especificar a discussão para os campos lógicos e ontológicos e não tão-somente explicitar uma cisão arbitrária entre o que é um objeto quântico e o que não é.

¹²⁶ Esse é o motivo pelo qual Breuer (cf. 2001, pp. 79-80) delinea o *problema da medição* em física quântica como o problema da compatibilidade entre o que está *fora da física* (tal como o processo 1) e o que está *dentro da física* (tal como o processo 2) (cf. Breuer, 2001, pp. 79-80).

¹²⁷ No original: “[...] *it is inherently entirely correct that the measurement or the related process of the subjective perception is a new entity relative to the physical environment and is not reducible to the latter. Indeed, subjective perception leads us into the intellectual inner life of the individual which is extra-observational by its very nature*”.

Ainda assim, de acordo com Lon Becker (2004), existe uma *interpretação padrão*¹²⁸ (cf. Everett, 1983 [1957]; Stapp, 1972; Albert, 1992; Barrett, 1999) acerca da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]) que considera que o “processo 1”, ou seja, o axioma do *colapso*, é um *processo físico* que ocorre durante uma medição, isto é, segundo Becker (2004, p. 121) que considera que “durante o processo de medição, um colapso físico ocorre, que modifica de modo indeterminista o estado do sistema que está sendo medido”¹²⁹.

Nessa *interpretação padrão* da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), como aponta David Albert (1992, pp. 80-81), o conflito entre os processos 1 e 2 ocorre na medida em que a todo instante do tempo o sistema se comporta de acordo com, exclusivamente, um *ou* outro sem que, no entanto, haja especificação de *quando* cada processo se aplicaria; para Becker (2004, p. 123), o aspecto central dessa interpretação é considerar que o colapso é um processo físico “que ocorre durante o processo de uma medição, embora não seja especificado em qual instante”¹³⁰.

No entanto, como observa Becker (2004), tal interpretação *não* seria advogada por von Neumann (1955 [1932]) e, mais ainda, em concordância com o que foi discutido nesta seção, precisamente *contradiz* a evidência textual contida nos capítulos V e VI de sua obra “*Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*” – que, como vimos anteriormente, é a obra em que von Neumann formula sua teoria da medição. Assim, deve ficar claro que o agente causal do processo 1, nomeadamente o

¹²⁸ Conforme aponta Becker (2004, p. 122), essa visão é compatível com o modo como o físico Hugh Everett III (1983 [1957]), proponente da interpretação da teoria quântica conhecida como a *interpretação do estado relativo (relative-state)*, posteriormente conhecida como a *interpretação dos muitos mundos (many-worlds)*, enxergara a teoria da medição de von Neumann (cf. Barrett 1999). Para Becker (2004, p.122), a similaridade entre a concepção de von Neumann e Everett seria que ambos considerariam que a representação matemática da função de onda seria completa, de modo que não haveria necessidade na introdução variáveis ocultas; no entanto, as implicações realistas do processo de medição associadas à interpretação everettiana não seriam compatíveis com a visão neumanniana. A interpretação do estado relativo será discutida nas seções seguintes.

¹²⁹ No original: “*during the process of measurement a physical collapse occurs which indeterministically changes the state of the system being measured*”.

¹³⁰ No original: “*that occurs during measurement process, although not at a specified time*”.

“ego abstrato” (cf. von Neumann, 1955 [1932], p. 421), *não* se refere a um processo físico.

Pelo que foi considerado até aqui, existem ao menos *duas leituras possíveis* da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), sendo uma *ontológica* e outra *puramente lógica*. Considerando a análise lógica, referimos o estudo de Thomas Breuer (2001, pp. 80-81), que faz uma aproximação entre a hierarquia infinita dos tipos lógicos, da linguagem-objeto e das infinitas metalinguagens subjacentes (isto é, a meta-metalinguagem, a meta-meta-metalinguagem, etc.) de Alfred Tarski (cf. 1956, pp. 241-265) e a cadeia infinita de observações de von Neumann (1955 [1932]). Para Breuer (2001, p. 80), tais hierarquias infinitas estão intimamente ligadas com o raciocínio da incompletude de Kurt Gödel (1967 [1931], p. 610, nota 48, ênfase nossa), o qual admite textualmente que “[...] a verdadeira razão para a incompletude é que a formação de tipos cada vez mais elevados pode ser continuado transfinitamente”¹³¹.

Na *teoria da verdade* de Tarski (1956), uma predicação da noção de *verdade* aplicável a todas as sentenças da linguagem-objeto não é parte da linguagem-objeto, mas de um tipo lógico de hierarquia mais alta, isto é, uma metalinguagem. Se o termo “verdade” for intercambiado por “*demonstrabilidade*” ou, mantendo o vocabulário gödeliano, pelo neologismo “*provabilidade*”, o raciocínio da incompletude de Gödel (1967 [1931], pp. 592-616) poderia ser parafraseado, segundo Breuer (2001, p. 80), da seguinte maneira “um conceito de provabilidade que é formulado dentro de um sistema formal não pode ser aplicado a todas as sentenças deste mesmo sistema”¹³².

Voltando ao raciocínio da hierarquia infinita na teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), uma medição não está completa no sistema $(X \wedge M)$, $(X \wedge M \wedge M')$, ou $(X \wedge M \wedge M' \wedge M'')$, etc., até que a aplicação do axioma do *colapso* (isto é, o processo 1) ocorra, o que somente aconteceria pela ação de um agente *fora* do

¹³¹ No original: “[...] the true reason of the incompleteness is that the formation of ever higher types can be continued into the transfinite”.

¹³² No original: “a concept of provability which is formulated within the formal system cannot apply to all sentences of that system”.

sistema, ou seja, *externo*. Nesse preciso sentido, a função de tal observador *O externo* pode ser aproximada a um funcionamento *metateórico*, isto é, a um nível lógico mais alto (um *meta-nível*). Para Breuer (2001, p. 81) a aproximação feita entre a concepção gödeliana de “obter uma prova de uma afirmação”¹³³ e concepção neummaniana de “obter o resultado de uma medição”¹³⁴ seria válida na medida em que “‘medição’ e ‘prova’ são ambos conceitos semânticos que estabelecem uma relação entre um formalismo físico ou matemático, e que são referidos pelo formalismo”¹³⁵.

Dadas as características lógicas da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), passemos à discussão em torno de seus aspectos ontológicos.

3.3 Consciência e medição quântica

Pudemos constatar que a posição de von Neumann (1955 [1932]) em relação ao problema da medição está comprometida ontologicamente com um novo objeto que compõe o mobiliário do mundo, isto é, com uma nova entidade com poder causal para completar uma medição: o “ego abstrato”, que tradicionalmente foi entendido como “a *consciência*”. Essa seria uma leitura *ontológica* da teoria da medição de von Neumann, permeada por diversas dificuldades filosóficas que serão exploradas nesta seção.

Para tanto, é relevante antes retomar que um dos aspectos do problema da medição seria o *conflito axiomático* da própria teoria. Utilizaremos o famoso experimento mental do *gato de Schrödinger* (1983 [1935], p. 157) para ilustrar tal problemática, uma vez que se trata de uma situação idealizada poucos anos mais tarde da publicação de von Neumann (1955 [1932]), para explicitar a dificuldade do “problema da medição” na mecânica quântica. O experimento mental do gato de Schrödinger (1983 [1935], p. 157) seria, na opinião do próprio autor, uma

¹³³ No original: “*having a proof of a statement*”.

¹³⁴ No original: “*having a result of a measurement*”.

¹³⁵ Tradução nossa. No original: “*measurement and proof are both semantic concepts in that they establish a relation between a physical or mathematical formalism, and what is referred to by the formalism*”

extrapolação (até mesmo “ridícula”) da descrição quântica da realidade, que se dá da seguinte maneira:

Um gato preso em uma câmara de aço, juntamente com o seguinte dispositivo diabólico (que deve ser resguardado contra a interferência direta do gato): um contador Geiger [um detector de radiação] com um pouco de substância radioativa, tão pouco que, talvez no curso de uma hora, um dos átomos decaia – mas também, com igual probabilidade, talvez nenhuma; se isso acontece, o contador descarrega e, através de um dispositivo elétrico, libera um martelo que quebra um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se o sistema for deixado a si mesmo por uma hora, poder-se-ia dizer que o gato ainda vive se enquanto isso nenhum átomo decaiu. O primeiro decaimento atômico o teria envenenado. A função de onda de todo o sistema poderia expressar isso por ter nela o gato vivo e o gato morto (desculpe a expressão) misturado ou espalhado em partes iguais.¹³⁶

O núcleo do argumento está contido na ideia de que, até que uma *observação direta* (cf. Schrödinger, 1983 [1935], p. 157) seja efetuada sobre o sistema em questão – isto é, uma *medição*, correspondente ao processo 1 – a descrição do formalismo quântico não forneceria senão *possibilidades*, com igual probabilidade, de dois estados *contrários*¹³⁷ – correspondente ao processo 2. Na interpretação de von Neumann (1955

¹³⁶ No original: “A cat is penned up in a steel chamber, along with the following diabolical device (which must be secured against direct interference by the cat): in a Geiger counter there is a tiny bit of radioactive substance, so small, that perhaps in the course of one hour one of the atoms decays, but also, with equal probability, perhaps none; if it happens, the counter tube discharges and through a relay releases a hammer which shatters a small flask of hydrocyanic acid. If one has left this entire system to itself for an hour, one would say that the cat still lives if meanwhile no atom has decayed. The first atomic decay would have poisoned it. The ψ -function of the entire system would express this by having in it the living and the dead cat (pardon the expression) mixed or smeared out in equal parts”.

¹³⁷ Na literatura tradicional, esse raciocínio é frequentemente expresso por meio da sentença “estados contraditórios”, no que se refere ao estado de *superposição* entre os estados “vivo” e “morto”. No entanto, preferimos utilizar a sentença “estados *contrários*” tendo em vista a definição de tais termos no clássico *quadrado de oposições*, onde uma situação de *contraditoriedade* se estabelece quando duas proposições *não podem ser simultaneamente verdadeiras nem simultaneamente falsas* e uma situação de *contrariedade* se estabelece quando duas proposições *não podem ser simultaneamente verdadeiras, mas podem ser simultaneamente falsas* (cf. Parsons, 2014). Krause (2010, p. 128, ênfase nossa) propõe que a *superposição* seja entendida como um terceiro estado, um estado “novo”: “[...] em certas “situações quânticas”, nomeadamente nas de *superposição*, não podemos de modo algum dizer – *como parece fácil de fazer a partir de uma visão “clássica”* – que dois objetos quânticos, como dois elétrons, quando em *superposição* de dois estados ψ_1 e ψ_2 (ou seja, quando são descritos por uma função de onda $\psi_{12} = \psi_1 + \psi_2$) estão em um dos dois estados. Nem no outro, nem em ambos, nem em nenhum – *que seriam as quatro situações logicamente possíveis* (de um ponto de vista “clássico” –, *mas podemos dizer que estão em um “novo” estado, o de *superposição* de ψ_1 e ψ_2* ”. No original: “[...] en ciertas “situaciones cuánticas”, notoriamente en las

[1932]), tal quadro se traduziria na afirmação de que nenhum evento *atual* ocorreria até que o sistema composto – isto é, o *sistema quântico e o aparelho de medição* – seja *percebido* pela *consciência* do observador.

Conforme aponta Jammer (1974, p. 482), a teoria da medição formulada por von Neumann (1955 [1932]), que culmina na tese de que a *consciência* é o agente causal responsável pelo ato da medição, não seria acessível a grande parte dos físicos experimentais da época na medida em que, sendo demasiadamente formal, requereria dos interlocutores um alto conhecimento de matemática. No entanto, tal teoria foi reelaborada pelos físicos Fritz Wolfgang London e Edmond Bauer (1983 [1939]) em um estudo publicado em 1939, que Jammer (1974, p. 482) considera uma apresentação “[...] concisa e simplificada”¹³⁸ da teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]).

O interesse do físico Fritz London por filosofia, especificamente pelo problema mente-corpo é documentado em uma pequena biografia escrita por sua esposa, Edith London (cf. London, 1961, pp. X-XIV). Dentre suas influências filosóficas, Jammer (1974, pp. 482-483) destaca Alexander Pfänder, objeto de análise na tese de doutorado em filosofia de London (cf. 1923)¹³⁹ e, principalmente, seu professor de filosofia em Munique, Erich Becher. Jammer (1974, p. 483) também ressalta que o estudo de

*de superposición, no podemos de forma alguna decir, como parece sencillo hacer desde un punto de vista “clásico”, que dos objetos cuánticos, como dos electrones, cuando en la superposición de dos estados ψ_1 y ψ_2 , o sea, cuando son descritos por una función de onda $\psi_{12} = \psi_1 + \psi_2$, no podemos decir que están en uno de los estados, ni en el otro, ni en ambos, ni en ninguno, que serían las cuatro situaciones lógicamente posibles (desde el punto de vista “clásico”), pero sí podemos decir que están en un estado “nuevo”, el de superposición de ψ_1 y ψ_2 ”. No caso do exemplo do gato de Schrödinger (1983 [1935], p. 157), tem-se três estados: o estado “vivo”, o estado “morto” e o estado “superposto”. No último, as proposições “o gato está vivo” e “o gato está morto” são *simultaneamente falsas*, o que parece configurar uma relação de *contrariedade* e não de *contraditoriedade*. Essa forma de interpretar o estado de *superposição* se coaduna com o fato de que os vetores matemáticos que representam os estados “vivo” e “morto” são *ortogonais*, e não a negação um do outro. Para uma discussão aprofundada e atualizada sobre o assunto, ver também Arenhart e Krause (2015).*

¹³⁸ No original: “[...] *concise and simple*”.

¹³⁹ De acordo com Jammer (1974, p. 482-483), a tese, apresentada no Instituto Arnold Sommerfeld em Munique, trata sobre Alexander Pfänder (1904), que influenciara a teoria psicológica de Theodor Lipps (1907), que, por sua vez, influenciaria a concepção de medição em mecânica quântica de London.

London e Bauer (1983 [1939]) faz referência a duas obras de Becher (1906; 1921), para quem *o problema mente-corpo seria a questão central em toda a metafísica*.

Em relação aos problemas da filosofia da mente, Becher rejeitaria, segundo Jammer (1974, p. 484, ênfase nossa), a doutrina do *epifenomenalismo*, isto é, o pensamento segundo o qual os processos mentais *emergem* ou *são causados* pelos processos cerebrais, e defende o *interacionismo*, isto é, o pensamento segundo o qual os processos físicos “[...] permeiam o cérebro em um curso contínuo e produzem, além de efeitos físicos, *efeitos psíquicos que por sua vez afetam de forma decisiva os eventos físicos*”¹⁴⁰. É natural que London tenha acatado à crítica de Brecher acerca do epifenomenalismo, uma vez que tenha dado continuidade à ideia neumanniana de que a *consciência* age sobre a matéria.

Para Jammer (1974, p. 484), London teria encontrado na mecânica quântica, especificamente no *problema da medição*, conforme delineado por von Neumann (1955 [1932]), um campo para aplicar tais ideias filosóficas, na medida em que, na interpretação de London e Bauer (1983 [1939], p. 251), a interação entre um objeto microfísico e um aparelho macroscópico de medição não seriam suficientes para produzir uma medição, de modo que uma medição ocorre somente quando tal sistema composto <objeto + aparelho> é “*observado*”, ou “*medido*” (em outras palavras, sofre os efeitos do chamado “*processo 1*”). No caso, seria a *consciência* que de fato *observa*, isto é, *completa uma medição*.

Tal afirmação deve, no entanto, melhor caracterizada, visto que existe um caráter metafísico da proposta London e Bauer (1983 [1939]) que difere da leitura da proposta de von Neumann (1955 [1932]) que fizemos até aqui. A interpretação de London e Bauer (1983 [1939]), como aponta Abner Shimony (1963, p. 759), considera que a *o observador* está no mesmo nível ontológico que o sistema composto (sistema microscópico e aparato de medição), de modo que “London e Bauer não parecem

¹⁴⁰ No original: “[...] pervade the brain in a continuous course and produce, in addition to physical effects, psychic effects which in turn decisively affect physical events”.

atribuir uma posição transcendente ao observador”¹⁴¹. Isto é, ao passo que von Neumann (1955 [1932]) enfatiza o caráter *meta-físico* do observador, London e Bauer (1983 [1939], p. 251) consideram que o observador está *no mesmo sistema composto* que o *sistema microscópico* e o *aparato de medição*, que pode ser representado como <objeto + aparelho + observador>.

O *observador* teria, ainda assim, um papel distinto dentro do sistema composto. A tese *subjetivista*, atribuída a von Neumann (cf. 1955 [1932], p. 421) devido à passagem em que considera o “ego abstrato” do observador o agente causal da medição, se torna explícita no estudo de London e Bauer (1983 [1939], p. 252, ênfase nossa) quando, em uma passagem decisiva, afirmam que a “*faculdade de introspecção*” é o agente causal na medição:

O observador tem uma impressão completamente diferente. Para ele, é apenas o objeto x e o aparelho y que pertencem ao mundo externo, para o que ele chama de “objetividade”. Por outro lado, ele tem *consigo mesmo* relações de uma maneira muito diferente. Ele possui uma faculdade característica e bastante familiar que podemos chamar de “faculdade de introspecção”. Ele pode acompanhar cada momento de seu próprio estado. Em virtude deste “conhecimento imanente” ele atribui a si o direito de *criar a sua própria objetividade* – ou seja, cortar a cadeia de correlações estatísticas [...]. É apenas a consciência de um “eu” que pode separá-lo da função anterior [...] e, em virtude de sua observação, configurar uma nova objetividade ao atribuir para o objeto uma nova função dali pra frente [...].¹⁴²

A consciência individual do observador, sua faculdade *interna*, de introspecção, é considerada por London e Bauer (1983 [1939], p. 252) um sistema *distinto* do sistema composto *material* – que se define pela interação entre o objeto microfísico e o aparelho medidor macroscópico – de modo que *este sistema, não sujeito*

¹⁴¹ No original: “London and Bauer do not seem to be attributing a transcendental position to the observer”.

¹⁴² No original: “The observer has a completely different impression. For him it is only the object x and the apparatus y that belong to the external world, to what he calls “objectivity” By contrast he has with himself relations of a very special character. He possesses a characteristic and quite familiar faculty which we can call the “faculty of introspection.” He can keep track from moment to moment of his own state. By virtue of this “immanent knowledge” he attributes to himself the right to create his own objectivity – that is, to cut the chain of statistical correlations [...] It is only the consciousness of an “I” who can separate himself from the former function [...] and, by virtue of his observation, set up a new objectivity in attributing to the object thence forward a new function [...]”.

às leis da mecânica quântica, é causal no sistema material. Nesse ponto as teses de von Neumann (1955 [1932]) e London e Bauer (1983 [1939]) se alinham. Como aponta Shimony (1963, p. 759), “é a propriedade peculiar do observador que, por possuir a faculdade de introspecção, pode conceder a si mesmo a abstração dos sistemas físicos com os quais interage”¹⁴³.

Em outras palavras, a interpretação subjetivista de von Neumann (1955 [1932]), endossada por London e Bauer (1983 [1939]), parece sugerir um estatuto ontológico privilegiado para a *consciência individual* do observador humano no universo. Dito ainda de outro modo, há claramente o comprometimento ontológico com uma entidade mental que é *causa* de uma entidade material, ponto em que a influência de Brecher no pensamento de London é notável (cf. Jammer, 1974, p. 484).

No entanto, atribuir tal papel à consciência individual pode levar a uma dificuldade filosófica bastante séria, que é o *solipsismo*, isto é, a implicação de que exista uma única subjetividade real e que todas as outras subjetividades sejam irreais ou ilusórias. Os próprios autores reconhecem essa dificuldade (London e Bauer, 1983 [1939], p. 258, ênfase nossa) ao reiterar que, em mecânica quântica, a existência de um objeto físico *depende do ato da medição* que, por sua vez, “[...] está intimamente ligado à consciência *da pessoa* que realiza [a medição], como se a mecânica quântica nos levasse a um completo solipsismo”¹⁴⁴.

Para enfrentar a problemática do solipsismo, os autores argumentam em favor de um *consenso intersubjetivo* dos fenômenos externos, visto que, na prática cotidiana, os fenômenos objetivos ocorrem *como se fossem de fato objetivos* no sentido de serem públicos e comuns a mais de uma subjetividade. Isso se apoiaria no fato de que *existe* tal coisa como uma *comunidade científica* (London e Bauer, 1983 [1939], p. 258), o que só seria possível mediante tal consenso intersubjetivo. Zeh (1983 [1970], p. 347, ênfase

¹⁴³ Tradução nossa. No original “It is the peculiar property of the observer, however, that by possessing the faculty of introspection he can attend to himself in abstraction from the physical systems with which he interacts”.

¹⁴⁴ No original: “[...] is intimately linked to the consciousness of the person making it [the measurement], and as if quantum mechanics thus drives us toward complete solipsism”.

nossa) considera tal situação uma localização dupla da consciência, ou “dois tipos de *subjetividade*”:

De acordo com a localização da dupla consciência existem dois tipos de subjetividade: o resultado de uma medição é subjetivo na medida em que depende do componente do mundo do observador; é objetivo no sentido de que todos os observadores desse componente do mundo observam *o mesmo resultado*.¹⁴⁵

Jammer (1974, p. 485) considera que tal tentativa de superar o solipsismo através do consenso intersubjetivo acaba por entrar em contradição com a hipótese inicial de que os dois componentes do sistema composto <objeto microfísico + aparelho macroscópico> estejam no *mesmo nível ontológico*. De fato, existe uma dificuldade, pois como poderia um sistema composto, *causado por uma consciência individual* C_{i_1} , ser objetivo, isto é, publicamente acessível a outras consciências individuais $C_{i_2} \dots C_{i_n}$ numa situação em que C_{i_1} não estivesse ciente do sistema composto? Isto é, a contradição está em assumir a auto existência de um objeto que, num raciocínio posterior, não existe por si, mas tão-somente diante de uma consciência individual.

3.3.1 O problema ontológico da consciência na mecânica quântica

A introdução da noção de consciência como um “objeto” metateórico, isto é, não físico no sentido de *não material*, na metafísica subjacente à medição quântica vem acompanhada de uma série de problemas ontológicos. Dentre eles, podemos identificar dois aspectos principais: 1) a problemática em relação à *definição* do termo “consciência”, isto é, se a *consciência* poderia ser entendida como *subjetividade*; 2) a problemática da relação mente-corpo (ou mente-cérebro), isto é, a relação *consciência-*

¹⁴⁵ No original: “According to the twofold localization of consciousness there are two kinds of subjectivity: the result of a measurement is subjective in that it depends on the world component of the observer; it is objective in the sense that all observers of this world component observe the same result”.

corpo (ou *consciência-cérebro*), isto é, de que forma tal porção *imaterial* do mundo interagiria com a porção material.

Ambos os casos têm raiz no mesmo problema, que categorizamos como ontológico: qual o lugar de tal “consciência” no mundo? Ou seja, o problema ontológico da consciência na mecânica quântica pode ser brevemente enunciado com a seguinte questão: “*o que é a consciência?*”. Buscaremos elencar como tal questão é abordada pela literatura, bem como a problemática suscitada por essa discussão.

A dificuldade de atribuir poder causal à consciência subjetiva na medição quântica fora explorada pelo físico Jenő Pál Wigner, naturalizado Jean-Paul Wigner (1983 [1961]), especificamente em seu artigo intitulado “*Remarks on the Mind-Body Question*” – considerado *provocador* por Jammer (1974, p. 499) –, que traduzido livremente para o português significa “*Considerações sobre a questão Mente-Corpo*”.

Primas e Esfeld (1997, p. 6) observam que, da mesma forma que London e Bauer (1983 [1939]), as contribuições de Wigner para a interpretação da mecânica quântica assumem o modelo de medição estabelecido por von Neumann (1955 [1932]). De acordo com Jammer (1974, p. 499), a interpretação subjetivista de London e Bauer (1983 [1939]) é aceita por Wigner (1983 [1961]), que propõe um experimento mental que, como aponta Jammer (1974, p. 499) posteriormente ficou conhecido como “o paradoxo da amiga de Wigner”¹⁴⁶.

A situação proposta por Wigner (1983 [1961], p. 171-173) pode ser descrita da seguinte maneira: suponha que todas as interações possíveis entre um indivíduo humano com um dado sistema físico se resumam a olhar para certo ponto em certa direção nos instantes de tempo $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$, e que as sensações possíveis que tal indivíduo possa vir a ter se resume a de ver ou não ver um flash de luz; suponha ainda que a formulação matemática representando a possibilidade do indivíduo *ver* o flash seja uma função de onda ψ_1 e que uma função de onda ψ_2 represente a possibilidade do indivíduo *não ver* o flash.

¹⁴⁶ No original: “*the paradox of Wigner’s friend*”.

Assim, a comunicabilidade da função de onda, qualquer que seja o resultado, dependeria daquilo que o indivíduo *observou*. Em outras palavras, ele poderia nos dizer *qual* das funções de onda seria o caso, isto é, se o indivíduo *viu* ou *não viu* o *flash* de luz. Espera-se que o resultado seja *objetivo* no preciso sentido em que seja *comunicável*, isto é, no caso de perguntarmos para um indivíduo X o *resultado da interação* num instante t , um *outro* indivíduo, Y , que interagisse com o sistema num instante $t + 1$ poderia se utilizar do resultado obtido em t *como se fosse* Y , e não X , que tivesse interagido com o sistema no instante t .

O raciocínio do experimento mental consiste em questionar o estado do indivíduo X , que observa o sistema no instante t *antes* de comunicar o resultado para o indivíduo Y . Dito de outro modo, o experimento mental propõe uma situação em que *alguém* realiza uma observação em um sistema. No caso, supondo que Y seja o *próprio* Wigner e que X seja a *amiga de Wigner*, qual seria o estado do sistema no instante de tempo *entre* a interação de X em t e a comunicação do resultado da interação para Y no instante $t + 1$?

Isto é, se for assumido que o estado inicial seja uma combinação linear dos dois estados possíveis relacionados com a probabilidade de que cada um dos estados seja o caso, o estado do sistema composto na interação <objeto + observador> (onde o termo “observador” corresponde à *amiga*) poderia ser descrito pela mecânica quântica através uma equação linear (cf. Jammer, 1974, p. 499). No entanto, de acordo com a mecânica quântica, não seria possível atribuir uma função de onda que descreva o objeto *antes* do final de uma medição, ou seja, antes que a amiga diga o resultado (isto é, se *viu* ou *não viu* o *flash*), mas tão-somente poder-se-ia atribuir uma função de onda ao sistema composto <objeto + amiga> (cf. Wigner, 1983 [1961], p.173).

Assim, Wigner (Y) pode interagir com o sistema composto <objeto + amiga> perguntando à amiga (X) se ela *viu* algum *flash*. Qualquer que seja o caso, a função de onda do sistema composto se modifica para um caso em que o objeto possa ser descrito uma função de onda *separada*, chamada *mistura* (“*mixture*”) – seja ψ_1 ou ψ_2 –,

e não mais pela equação que abarca as duas possibilidades. Como tal mudança ocorre *somente* em contato com Y , Wigner (1983 [1961], p. 173, ênfase nossa) interpreta tal situação de modo a sugerir uma ontologia *solipsista* para a mecânica quântica:

[...] a mudança típica na função de onda ocorrida somente quando alguma informação (o “sim” ou “não” da minha amiga) entra na *minha consciência*. Disto se segue que a descrição quântica dos objetos é influenciada por impressões que entram na minha consciência. O solipsismo pode ser logicamente consistente com a mecânica quântica presente; já o monismo, no sentido materialista, não é.¹⁴⁷

Um ponto central no raciocínio acima, do monismo materialista, será discutido adiante. Por hora, discutiremos o ponto em que Wigner (1983 [1961], p. 172-173, ênfase nossa) considera que a *consciência do observador modifica ativamente o conhecimento*¹⁴⁸ do sistema e, com isso, as condições de previsibilidade do sistema dos *flashes*, isto é, modifica sua representação matemática através da função de onda:

[...] a impressão que se obtém em uma interação, chamada também de o resultado de uma observação, modifica a função de onda do sistema. A função de onda modificada é, além disso, em geral imprevisível antes que impressão adquirida na interação entrasse em nossa consciência: *é a entrada de uma impressão em nossa consciência, que altera a função de onda* porque modifica ou avaliação das probabilidades para diferentes impressões que esperamos receber no futuro.¹⁴⁹

¹⁴⁷ Tradução nossa. No original, “[...] *the typical change in the wave function occurred only when some information (the yes or no of my friend) entered my consciousness. It follows that quantum description of objects is influenced by impressions entering my consciousness. Solipsism may be logically consistent with present quantum mechanics, monism in the sense of materialism is not*”.

¹⁴⁸ Wigner (1983 [1961], p. 169, nota 3) se utiliza dos textos posteriores de Werner Heisenberg (1958, pp. 87-99), como o *Physics and Philosophy*, onde o autor se refere ao termo “consciência” (“*consciousness*”) como “conhecimento” (“*knowledge*”).

¹⁴⁹ No original: “[...] *the impression which one gains at an interaction, called also the result of an observation, modifies the wave function of the system. The modified wave function is, furthermore, in general unpredictable before the impression gained at the interaction has entered our consciousness: it is the entering of an impression into our consciousness which alters the wave function because it modifies our appraisal of the probabilities for different impressions which we expect to receive in the future*”.

A situação proposta é análoga à cadeia infinita de observações de von Neumann (1955 [1932]): enquanto a interação do sistema composto <objeto + amiga> estiver no mesmo nível, não há de fato uma medição. Há que se perguntar “*quem observa o observador?*”, pois até que um *observador final*, em um *meta-nível*, interaja com o sistema composto, uma medição não estará completa. Para Wigner (1983 [1961], p. 176, ênfase nossa), quem teria tal *meta-posição* privilegiada seria, no limite do solipsismo, *ele mesmo*¹⁵⁰, isto é, a *amiga*, ocupando a posição de um *observador intermediário*, não poderia ter o *resultado da observação registrado em sua consciência a despeito do observador final*: “[...] a teoria da medição, direta ou indireta, é logicamente consistente desde que eu mantenha minha posição privilegiada de observador final”¹⁵¹.

Ainda assim, se, depois de completada a situação proposta acima, Wigner (1983 [1961], p. 176) perguntar à amiga sobre o estado do objeto S *antes da interação entre X e Y proposta no raciocínio acima*, a amiga responderia (a depender do que tenha sido o caso de S) que “eu já lhe disse, eu vi [não vi] um *flash*”¹⁵². Como observa Jammer (1974, p. 499), a questão sugere que a *amiga* já teria a resposta *antes da sua interação com o observador final*, isto é, já teria o resultado da observação registrado em sua consciência, ou seja, *o estado atual de S imediatamente após sua interação com o objeto*, a despeito do observador final, levando a cabo uma contradição com o raciocínio exposto no parágrafo acima.

Para ilustrar a problemática que está em jogo, Wigner (1983 [1961], p. 177) propõe que o papel do *observador intermediário* seja trocado: ao invés da *amiga*, que se utilize um simples aparelho físico de medição, que amplificaria o sinal de um átomo que poderia (ou não) ser excitado pela luz do *flash* no sistema S. Neste caso, como aponta Jammer (1974, p. 499), não haveria dúvida de que uma representação matemática, através de uma equação linear, poderia descrever o sistema composto

¹⁵⁰ Claramente endossando as posições de von Neumann (1955 [1932], p.421) nomeadamente ao papel causal de um “*abstract ego*”, e de London e Bauer (1983 [1939], p. 252) no que se refere ao papel causal da “*faculty of introspection*”.

¹⁵¹ No original: “[...] *the theory of measurement, direct or indirect, is logically consistent so long as I maintain my privileged position as ultimate observer*”.

¹⁵² No original: “*I told you already, I did [did not] see a flash*”.

<objeto + aparelho> – contrariamente à assunção de que tal interação poderia indicar o estado *atual* de S. Com isso em mente, se modificarmos novamente o *observador intermediário*, voltando a considerá-lo como a *amiga*, a representação matemática, de acordo com Wigner (1983 [1961], p. 177, ênfase nossa) “[...] parece absurda, pois implica que minha amiga estaria em um estado de *animação suspensa* antes de responder à minha pergunta”¹⁵³, isto é, parece absurda por implicar não só que o objeto S não teria seu estado atual desenvolvido (ou seja, o *flash* não teria *nem não* teria sido disparado) mas, principalmente, que a *amiga* não teria sua própria existência atualizada *até que houvesse a ação interativa de Y sobre o sistema composto <amiga + objeto>*. A fim de esclarecer tal dificuldade, Wigner (1983 [1961], p. 177-178, ênfase nossa) conclui que:

Segue-se que o ser com uma consciência deve ter um papel diferente na mecânica quântica que o dispositivo de medição inanimado: o átomo considerado acima [...]. Esse argumento implica que “minha amiga” tem os mesmos tipos de impressões e sensações como eu - em particular, que, depois de interagir com o objeto, ele não está nesse estado de animação suspensa [...]. Não é necessário ver aqui uma contradição a partir do ponto de vista da mecânica quântica ortodoxa, e não há se acreditarmos que a alternativa é sem sentido se a consciência da minha amiga contém tanto a impressão de ter visto um flash ou de não ter visto um flash. No entanto, *negar a existência da consciência de uma amiga a este ponto é certamente uma atitude antinatural que se aproxima do solipsismo, e poucas pessoas, em seus corações, irão segui-la.*¹⁵⁴

Jammer (1974, p. 500, ênfase nossa), comentando a citação destacada acima, escreve que “Wigner viu nesse argumento uma indicação de que a *consciência* ou a *mente* influencia as condições psicoquímicas de sistemas vivos, assim como é

¹⁵³ No original: “[...] appears absurd because it implies that my friend was in a state of suspended animation before he answered my question”.

¹⁵⁴ No original: “It follows that the being with a consciousness must have a different role in quantum mechanics than the inanimate measuring device: the atom considered above [...]. This argument implies that “my friend” has the same types of impressions and sensations as I – in particular, that, after interacting with the object, he is not in that state of suspended animation [...]. It is not necessary to see a contradiction here from the point of view of orthodox quantum mechanics, and there is none if we believe that the alternative is meaningless whether my friend’s consciousness contains either the impression of having seen a flash or of not having seen a flash. However, to deny the existence of the consciousness of a friend to this extent is surely an unnatural attitude, approaching solipsism, and few people, in their hearts, will go along with it”.

influenciada por elas”¹⁵⁵, e aponta que, após este texto, Wigner passou a se interessar pelo problema mente-corpo e as relações entre mente e matéria (cf. Wigner, 1964). No entanto, gostaríamos de ressaltar outro ângulo do trecho destacado. O exemplo da *amiga de Wigner* aponta uma séria dificuldade para, ao mesmo tempo, a interpretação *subjetivista* da medição quântica e para a interpretação ortodoxa, positivista: o *solipsismo*.

No primeiro caso, argumentar que a percepção subjetiva da *amiga* tem uma relevância *causal* (e até mesmo *ontológica*, no caso, modifica o sistema do *estado suspenso* para um *estado real*) sobre o sistema observado torna outra subjetividade qualquer *ontologicamente irrelevante* para o caso, o que implica na tese solipsista de que *apenas uma subjetividade é real*. No último caso, na medida em que a doutrina positivista considera que *as afirmações sobre aquilo que ocorre entre a observação da amiga e a comunicação pública do resultado não tem valor cognitivo*, isto é, que seria *irrelevante*, do ponto de vista experimental, afirmar que *a amiga tem* (ou não) *consciência*, o que acaba por negar-lhe subjetividade, o que também é característico do solipsismo.

Quando Wigner (1983 [1961], p. 177) concede de modo solipsista à sua *amiga* um *estado de suspensão*, parece sugerir que no raciocínio todo *só há um colapso*, isto é, somente um momento em que uma medição é efetivamente realizada: quando Wigner (e não a amiga) tem consciência de todo o processo através da interação com a *amiga*.

Um raciocínio semelhante foi proposto pelo matemático Roger Penrose (1989, p. 290-293), que revisita a situação do *gato de Schrödinger* adicionando no raciocínio um *observador humano* – propriamente vestido com um traje que o proteja do veneno – *dentro da caixa onde se encontra o gato* e todo o restante do aparato que envolve o experimento mental de Schrödinger (1983 [1935]). No experimento revisitado por Penrose (1989, p. 293), o observador *de dentro*, que visualiza *diretamente* o que ocorre com o gato, e o observador *de fora*, que é limitado pelo cálculo das probabilidades

¹⁵⁵ No original: “Wigner saw in this argument an indication that consciousness or mind influences the psychochemical conditions of living systems just as it is influenced by them”.

sobre o que ocorre com o gato, teriam, forçosamente, impressões discrepantes sobre o que acontece com o gato. Isso ocorreria *até que a caixa fosse aberta*, quando as impressões tornariam-se precisamente as mesmas.

Tal situação é oportuna para visualizarmos o paradoxo colocado por Wigner (1983 [1961]). Se acatarmos a tese de que a consciência humana (individual/subjetiva) é de alguma maneira causa do que acontece com o gato, então teríamos a mesma situação que se tem com o raciocínio da *amiga de Wigner*: a consciência *de quem*¹⁵⁶ atuou como agente causal no caso proposto por Penrose (1989)? A do observador *de dentro* ou do observador *de fora*? Isso configura um problema, pois a metafísica associada a qualquer uma das duas respostas seria o *solipsismo*, isto é, somente a consciência que atua como agente causal seria *real*.

No entanto, ao final do raciocínio da *amiga de Wigner* (1983 [1961], p. 173), fica claro que a assunção do solipsismo, na afirmação de que “[...] o solipsismo pode ser logicamente consistente com a mecânica quântica presente”¹⁵⁷ parece ter um significado *estritamente metodológico*. Em outras palavras, é precisamente a ideia de uma *interpretação subjetivista* para o conceito de “consciência” na mecânica quântica que entra em xeque com a situação paradoxal proposta em tal raciocínio, isto é, a ideia de que a consciência subjetiva, individualizada, seria agente causal na medição quântica.

Talvez uma das formas mais expressivas do descontentamento em relação às interpretações *subjetivistas* fora formulada pelo físico John Bell (1989 [1984], p. 170, ênfase nossa):

[...] permita-me argumentar contra um mito... que a teoria quântica tenha de alguma forma desfeito a revolução copernicana. Desde aqueles que fizeram essa revolução, aprendemos que o mundo é mais inteligível quando não nos imaginamos no centro dele. A teoria quântica não colocaria novamente “observadores”... nós... no centro do quadro? De fato, muito se

¹⁵⁶ É relevante constatar que von Neumann (1955 [1932], p. 445) já havia considerado que haveriam dificuldades no caso de mais de um observador concomitante; no entanto, ao invés de investigar, o autor deixa a problemática nas mãos de quem lê.

¹⁵⁷ No original: “[...] solipsism may be logically consistent with present quantum mechanics”.

diz a respeito de “observáveis” nos livros de teoria quântica. *E a partir de alguns textos de divulgação, o público geral poderia ficar com a impressão de que a própria existência do cosmos dependeria de que estejamos aqui para observar os observáveis.*¹⁵⁸

Bell (1989 [1984]) se posicionou tacitamente *contra* tal ideia de que a *subjetividade* seja um agente causal necessário para que haja o universo, o que parece coadunar com o raciocínio de Wigner (1983 [1961]) através do raciocínio expresso no *paradoxo da amiga*. Ainda assim, a conclusão do argumento wigneriano seria *ontológica* na medida em que o comprometimento ontológico com um *novo objeto* – a consciência – com poder causal é introduzido no *mobiliário do mundo*.

Pelo que foi exposto, parece seguro afirmar que a posição de Wigner sobre a noção de *consciência* (ou *mente*) se comprometeria com uma ontologia de alguma forma *dualista* (cf. Albert, 1992, p. 83, nota 3), da qual surgem diversos outros problemas filosóficos (cf. Robinson, 2012).

Tal abordagem, no entanto, vai além das dificuldades ontológicas do dualismo: como observa Albert (1992, p. 82), a tese defendida por Wigner dependeria de uma separação entre A) sistemas inteiramente *materiais* e B) sistemas *conscientes*, isto é, a separação entre sistemas não-conscientes e sistemas conscientes, de modo

¹⁵⁸ No original: “[...] let me argue against a myth... that quantum theory had undone somehow the Copernican revolution. From those who made that revolution we learned that the world is more intelligible when we do not imagine ourselves to be at the center of it. Does not quantum theory again place ‘observers’... us... at the center of the picture? There is indeed much talk of ‘observables’ in quantum theory books. And from some popular presentations the general public could get the impression that the very existence of the cosmos depends on our being here to observe the observables”. O excerto citado continua da seguinte forma: “[...] O único ‘observador’ que é essencial na prática da teoria quântica ortodoxa é o aparato inanimado que amplifica o sinal microscópico para consequências macroscópicas. É claro que esse aparato, em experimentos laboratoriais, são escolhidos e ajustados por físicos experimentais. Neste sentido, o resultado dos experimentos são de fato dependentes do processo mental dos experimentadores! Mas, uma vez que o aparato está preparado, funcionando e intocado, é completamente indiferente... de acordo com a mecânica quântica usual... se os experimentadores ficassem assistindo ou delegassem tal “observação” aos computadores”; no original: “[...]The only ‘observer’ which is essential in orthodox practical quantum theory is the inanimate apparatus which amplifies microscopic events to macroscopic consequences. Of course this apparatus, in laboratory experiments, is chosen and adjusted by the experimenters. In this sense the outcomes of experiments are indeed dependent on the mental processes of the experimenters! But once the apparatus is in place, and functioning untouched, it is a matter of complete indifference... according to ordinary quantum mechanics... whether the experimenters stay around to watch, or delegate such ‘observing’ to computers”, o que demonstra a preocupação de Bell (1989, p. 170) com o fato de que, como explicitamos anteriormente, a mecânica quântica *funciona muito bem na prática*, a despeito das dificuldades de ordem filosófica que apresenta em seu aspecto *interpretativo*.

que a evolução do estado físico de um dado objeto quântico seria diferente caso o objeto *fosse ou não consciente*. Consequentemente, o entendimento do comportamento dos objetos quânticos dependeria da *definição* ou do *significado* do termo “consciência”.

No entanto, Wigner (tampouco London e Bauer ou von Neumann) parece não oferecer uma definição do termo “consciência” (cf. Albert, 1992, p. 83), de modo que não fica claro o significado de uma sentença tal como a afirmação de que “*a consciência é o agente causal na medição quântica*”. Assim, a problemática suscitada pela interpretação ontológica da concepção neummaniana de que *a medição seria completa somente com a introdução de um agente causal meta-físico* permanece em aberto – e, como aponta Smith (2003), os resultados de tal debate (se a consciência não física é realmente um agente causal ou não) seriam definitivos para as discussões contemporâneas, especialmente nas áreas da *filosofia da mente* e nas *ciências cognitivas* (cf. Smith, 2003).

Deve ficar claro neste ponto que a noção de “consciência”, conforme apresentada até aqui, desempenha um papel fundamentalmente distinto da ordem material, onde se situam os sistemas físicos. Nesse preciso sentido, há o abandono de uma ontologia monista materialista¹⁵⁹, como aponta Wigner (1983 [1961], p. 173).

¹⁵⁹ Ekehart Köhler (2001, p. 114) propõe uma leitura fiscalista da consciência em von Neumann: “[...] pode-se dizer que von Neumann era um reducionista psicofísico, que pensava que a inteligência humana poderia a princípio ser apresentada e explicada em um nível físico – em particular, neurofisiológico, em termos de redes neurais”; no original: “[...] one may say von Neumann was a psychophysical reductionist who thought human intelligence could in principle be presented and explained on a physical level – in particular, neurophysiologically, in terms of nerve nets”. No entanto, conforme a observação de Henry Stapp (2007, p. 159) que contrapõe tal leitura, “*von Neumann poderia de fato não ter excluído essa possibilidade* [de uma concepção fiscalista da consciência], *mas eu duvido que qualquer uma de suas afirmações poderia tê-lo comprometido com a posição de que a inteligência humana, e, mais importante, seu processo 1* [processo de medição, em que von Neumann introduz a ação causal da consciência sobre um sistema físico], *possa ser explicado em termos mecanicistas locais. A afirmação citada acima* [precisamente a mesma citação de Köhler que destacamos acima] *certamente falha em justificar tal conclusão*”; tradução nossa; no original “*von Neumann may indeed have not excluded that possibility, but I doubt that any statement of his shows him to be committed to the position that human intelligence, and, more importantly, his process 1, can be explained in local mechanistic terms. The statement quoted above certainly fails to justify such a conclusion*”.

Conforme a analogia proposta por diversos autores do estatuto ontológico dos objetos que compõem o mundo como o *mobiliário do mundo* (Bunge, 1977; Cushing, 1994, p. 9; John Preston, 2008, p. 56; Arenhart, Krause, 2012), destacamos, em específico, que tal interpretação, que caracterizaremos como *interpretação ontológica da consciência*, carece de uma *formulação* ontológica (do tipo O1) que abarque este *novo objeto*: a *consciência*.

No entanto, mantendo a analogia, nenhuma descrição deste *novo mobiliário* fora apresentada¹⁶⁰. Pelo contrário, a única categorização que é feita em relação ao termo “consciência” é que se trata de um objeto metafísico, metateórico, distinto dos objetos materiais, o que sugere que essa *consciência* se trata de uma *substância* distinta da *substância* material. Tal proposta, como observam Henry Stapp (2007, p. 167) e Michael Stöltzner (2001, pp. 58-59), se alinha com o *dualismo* do tipo *cartesiano*, conhecido como “dualismo de substância” (“*substance dualism*”), que possui diversas dificuldades filosóficas – uma das *grandes questões* seria o problema mente-corpo (cf. Robinson, 2012).

Podemos delinear a questão da seguinte maneira: da forma como colocado por von Neumann (1955 [1932]) e Wigner (1983 [1961]), a noção de “consciência” com poder causal na medição quântica deveria cumprir as seguintes caracterizações: 1) a consciência é *imaterial*, no sentido de que não pertence ao mesmo nível ontológico que os sistemas quânticos, isto é, deve ser considerada em um *meta-nível* em relação à aplicação da mecânica quântica; 2) a consciência *não é subjetiva*, isto é, individualizada.

¹⁶⁰ Como aponta Eckehart Köhler (2001, p. 114), “*von Neumann consistentemente evitava discussões ‘filosóficas’ de questões epistemológicas*”; no original: “*von Neumann consistently avoided ‘philosophical’ discussions of epistemological issues*”.

3.3.2 Abordagens dentro do paradigma da consciência

Nos parágrafos seguintes, elencaremos algumas tentativas de abordar a consciência na medição quântica de modo a responder as dificuldades filosóficas do dualismo, de acordo com as caracterizações acima. Escolhemos as propostas dos físicos Ludvik Bass (1971) e Amit Goswami (1989), por tratarem diretamente das questões apresentadas aqui e serem alternativas pouco abordadas na literatura.

A falta de debate em torno das implicações filosóficas da noção de “consciência” relacionada à medição quântica seria, para Bass (1971, pp. 52-53), fator determinante para que situações paradoxais – tal como a proposta de Wigner (1983 [1961]) aparecessem *erroneamente*. Para tanto, a proposta de Bass (1971) se trata de uma generalização ontológica do pensamento *tardio* de Erwin Schrödinger¹⁶¹ (1967 [1944], 1964) para solucionar a situação paradoxal presente no raciocínio da *amiga de Wigner*.

Para Schrödinger (1964, p. 18, ênfase nossa), os debates em relação ao conceito de *consciência* ou *mente* enfrentariam uma situação *problemática*, devido ao frequente comprometimento ontológico com a existência de *múltiplas mentes* – tal como a situação da *amiga de Wigner* parece pressupor: “Para a filosofia [...] a dificuldade real está na multiplicidade espacial e temporal de observadores e indivíduos cognoscentes. *Se todos os eventos ocorressem em uma consciência, a situação seria extremamente simples*”¹⁶².

Pode-se perceber na passagem anteriormente citada, assim como em diversas outras (cf. Cohen, 1992), o comprometimento ontológico com a existência de *uma*

¹⁶¹ Um estudo detalhado sobre a concepção filosófica tardia de Schrödinger pode ser encontrado na tese de doutorado de Caroline Murr (2014).

¹⁶² No original: “*For philosophy [...] the real difficulty lies in the spatial and temporal multiplicity of observing and thinking individuals. If all events took place in one consciousness, the whole situation would be extremely simple*”.

única mente que, conforme observa Bruno Bertotti (1985, p. 91, ênfase nossa), é própria do pensamento indiano, especificamente do Vedanta¹⁶³:

O enigma das consciências individuais e sua comunidade levaram ele [Schrödinger] a uma posição, característica da filosofia indiana, que é o fundamento filosófico do clássico Vedanta: *todas as mentes individuais [...] são manifestações de uma única Mente que abrange tudo*.¹⁶⁴

Altamente influenciado pelo pensamento do Vedanta (cf. Bitbol, 2004, p. 171; Cohen, 1992), Schrödinger (1967 [1944], p. 89) faz uso da noção de “*māyā*”¹⁶⁵,

¹⁶³ Sobre o termo “Vedanta”, destacamos um trecho de uma exposição de George Conger (1944, p. 239), que explicita precisamente o aspecto metafísico do Vedanta que é abordado na discussão acima: “[...] a filosofia central dos Upanixades e do Vedānta, muitas vezes considerada panteísta, seria descrita com maior precisão como um monismo espiritualista. Exemplo melhor de panteísmo é apresentado pelo Deus de Espinosa com um número infinito de atributos. No Advaita Vedānta, Brahman é caracterizada por sat (ser), cit (inteligência) e ānanda (bem-aventurança), ao invés de uma gama de atributos pessoais; [...] Brahman é alcançada pelo indivíduo que chega a compreender sua própria identidade com a Realidade Una”; no original: “[...] the central philosophy of the Upanishads and the Vedānta, often said to be pantheistic, is more accurately described as spiritualistic monism. A better example of pantheism is afforded by Spinoza’s God with an infinite number of attributes. In the Advaita Vedānta the one Brahman is characterized by sat (being), cit (intelligence), and ānanda (bliss), rather than by the whole range of personal attributes; [...] Brahman is attained by the individual who comes to understand his own identity with that One Reality”.

¹⁶⁴ No original: “The puzzle of the individual consciousnesses and their commonality led him to a position, characteristic of Indian philosophy, which is the philosophical foundation of the Vedanta classics: all individual minds [...] are the manifestation of a single Mind which encompasses everything”.

¹⁶⁵ Gough (1981, p. 237) aponta que “a doutrina de māyā, ou a irrealidade do dualismo sujeito/objeto, bem como a irrealidade da pluralidade de almas e seu ambiente, é a vida da filosofia indiana primitiva”; no original: “The doctrine of Maya, or the unreality of the duality of subject and object and the unreality of the plurality of souls and their environment, is the very life of the primitive Indian philosophy”. Assim, não se remete *exclusivamente* ao Vedanta. Ainda assim, conforme Bertotti (1985), a influência do pensamento tardio de Schrödinger (1967 [1944], 1964) seria primordialmente o Vedanta, destacaremos apenas seu uso dentro do sistema vedantino. De acordo com Radhakrishnan (1914, p. 431), o termo “Maja” (“*māyā*”, em sânscrito) se insere no sistema vedantino da seguinte forma: “[...] apenas o Absoluto, chamado Brahman, é real e as manifestações finitas são ilusórias. Há apenas uma realidade absoluta e indiferenciada, cuja natureza é constituída pelo conhecimento. O mundo empírico é inteiramente ilusório, com suas distinções de mentes finitas e objetos e os objetos de seu pensamento. Sujeitos e objetos são como imagens fugazes que englobam a alma que sonha, e que se reduzem a nada no momento em que acorda. O termo “*māyā*” significa o caráter ilusório do mundo finito. [...] Os aspectos centrais da filosofia Vedantina, como é concebida atualmente, são resumidamente explicitados nas seguintes frases: Brahman é o real e o universo é falso, /O Atman [termo que designa a “alma individual”] é Brahman. Nada mais.”; no original: “[...] the Absolute called Brahman alone is real and the finite manifestations are illusory. There is one absolute undifferentiated reality, the nature of which is constituted by knowledge. The entire empirical world, with its distinction of finite minds and the objects of their thought, is an illusion. Subjects and objects are like the fleeting images which encompass the dreaming soul and melt away into nothingness at the moment of waking. The term Maya signifies the illusory character of the finite world. [...] The central features of the Vedanta philosophy, as it is conceived at the

correspondente à distinção – bastante antiga também na filosofia grega – entre o que é real e o que seria aparente para responder à questão da multiplicidade das mentes:

A única alternativa possível é manter a experiência imediata de que a consciência é singular que desconhece plural; que *existe* apenas uma coisa e que aquilo que parece ser pluralidade é meramente uma série de diferentes aspectos dessa única coisa, produzida por uma ilusão (o termo indiano “*māyā*”).¹⁶⁶

Desta forma, a multiplicidade das mentes seria uma *aparência* ao passo que a unicidade da mente seria *real*¹⁶⁷ ou, nas palavras de Cohen (1992, p. 97-98), “não existe ‘realmente’ uma multiplicidade de eus. [...] existe uma unidade de todas as consciências”¹⁶⁸. Schrödinger (1964, p. 18, ênfase nossa) reconhece, no entanto, que tal debate não se daria no campo da razão lógico-dedutiva, conforme explicita na seguinte passagem: “*eu não penso que essa dificuldade possa ser resolvida logicamente, através de um pensamento consistente, em nossos intelectos. [...] a pluralidade que percebemos é apenas aparente, não é real*”¹⁶⁹. De forma mais enfática, Schrödinger (1964, p. 95, ênfase nossa) explicita que tal ideia, própria do pensamento do Vedanta, é um pensamento místico¹⁷⁰:

present day, are briefly explained in the lines: Brahman is the real, the universe is false,/The is Brahman. Nothing else”.

¹⁶⁶ No original: “*The only possible alternative is simply to keep the immediate experience that consciousness is a singular of which the plural is unknown; that there is only one thing and that what seems to be a plurality is merely a series of different aspects of this one thing, produced by a deception (the Indian MAJA).*”

¹⁶⁷ Ainda assim, Schrödinger haveria debatido tal questão – por mais que considerasse aparente – com Carnap. Para uma exposição detalhada do debate, cf. Bitbol (2004).

¹⁶⁸ No original: “*there ‘really’ is no multiplicity of selves. [...] there is a unity of all consciousness”.*

¹⁶⁹ No original: “*I do not think that this difficulty can be logically resolved, by consistent thought, within our intellects. [...] the plurality that we perceive is only an appearance; it is not real”.*

¹⁷⁰ No entanto, a ligação deste aspecto de seu pensamento, caracterizado como “misticismo racional” (cf. Bertotti, 1985; Cohen, 1992) é obscura. Cohen (1992, p. 98) acredita que a ausência de uma ligação se dá pela posição de schödingeriana de que a ciência deve ser fundamentalmente *objetiva*, isto é, *deve excluir de forma preliminar o sujeito que conhece daquilo que é conhecido*. Ainda assim, Schrödinger (cf. Cohen, 1992, p. 99) não defenderia uma ideia de ciência subjetiva, como em alguns sistemas metafísicos, tampouco objetiva à maneira do empirismo moderno: mas *impessoal*. Um estudo detalhado da posição de Schrödinger acerca da *objetividade* pode ser encontrado no estudo de Caroline Murr (2010).

Resumidamente, é a visão de que *todos nós*, seres vivos, somos unidos na medida em que *somos, na verdade, lados ou aspectos de um único ser*, que talvez na terminologia ocidental possa ser chamado de “Deus” enquanto nos Upanixades seu nome é “Brahman”. [...] Nós reconhecemos que estamos lidando aqui não com algo logicamente dedutível, mas com *metafísica mística*.¹⁷¹

Para Murr (2014, p. 212), a metafísica schrödingeriana, justamente por ter uma estreita relação com seu trabalho científico, não deve ser entendida como um aspecto *religioso*, mas essencialmente filosófico; Poser (1992, p. 161, ênfase nossa) vai além e aponta que sua proposta filosófica é mais do que uma *continuação* de seu trabalho científico: “talvez seja mais adequado enxergar a posição ontológica de Schrödinger na física como um *resultado* de suas reflexões filosóficas”¹⁷². Para Schrödinger (1964, p. 5, ênfase nossa), a “[...] metafísica não faz parte do edifício do conhecimento, mas é seu suporte, sem o qual nenhuma construção futura é possível. Talvez possamos dizer até mesmo que *a metafísica se transforma em física no curso de seu desenvolvimento*”¹⁷³.

Poser (1992, p. 163) classifica a metafísica schrödingeriana como um “monismo idealista dinâmico”, cuja expressão máxima se encontra na expressão sânscrita “*tat tvam asi*”, que Huxley (1947, p. 8) traduz para o inglês como “*That art thou*”, que traduzido livremente para o português significaria algo como “tu és Isto”, e que Schrödinger (1964, p. 22) interpreta como: “Eu estou no leste e no oeste, eu estou abaixo e acima, *eu sou o universo todo*”¹⁷⁴. Poser (1992, p. 166) destaca ainda que Schrödinger (1964) utiliza a metafísica vedantina como *referencial ontológico* para seu projeto científico e filosófico, e não como autoridade religiosa; isto é, utiliza da

¹⁷¹ No original: “*Briefly stated, it is the view that all of us living beings belong together in as much as we are all in reality sides or aspects of one single being, which may perhaps in western terminology be called God while in the Upanishads its name is Brahman. [...] We have already conceded that we are here dealing not with something logically deducible but with mystical metaphysics*”.

¹⁷² No original: “*It is perhaps more adequate to see Schrödinger’s ontological standpoint in physics as the outcome of his philosophical reflections*”.

¹⁷³ No original: “[...] *metaphysics does not form part of the house of knowledge but is the scaffolding, without which further construction is impossible. Perhaps we may even be permitted to say: metaphysics turns into physics in the course of its development*”.

¹⁷⁴ No original: “*I am in the east and in the west, I am below and above, I am this whole world*”.

discussão presente no Vedanta para *argumentar* em favor de sua proposta, de modo que *constrói um modelo* aberto a críticas e não um dogma incontestável.

Bertotti (1985, p. 83) utiliza o termo “misticismo racional” para classificar tal tipo de atitude, identificada em pensadores como Erwin Schrödinger e Albert Einstein:

No desenvolvimento da física teórica durante o segundo trimestre deste século [XX] pode-se reconhecer, creio eu, a influência de uma visão de mundo particular que poderia ser chamado de “misticismo racional” [...] [na qual] o ‘existente’ é um todo, e sua unidade pode ser apreendido intuitivamente.¹⁷⁵

Como observa Murr (2014, p. 212), o referido sentimento de “unidade” pode ser alcançado por diversas vias, sendo a técnica da *meditação* uma delas. Wilber (1977, p. 152) vai além e considera que tal unidade é empírica:

A psicologia vedantina funda-se na introvisão experimentalmente verificável de que *Brahman-Atman* é a única Realidade, e sua preocupação primária consiste em proporcionar uma explicação pragmática do “por que” os seres humanos não compreendem sua básica e suprema identidade com *Brahman*. Em geral, a cega aceitação, pelos humanos, de dualismos e distinções é a ignorância (*avidyā*) que os fazem pousar diretamente num mundo de ilusões (*māyā*).¹⁷⁶

Tal referencial, que Murr (2014, pp. 211-214) chama de “pós-objetivado”, é utilizado por Bass (1971) em um artigo intitulado “*The Mind of Wigner’s Friend*” (que traduzido livremente para o português significa “A Mente da Amiga de Wigner”), na tentativa de solucionar o paradoxo da amiga de Wigner (1983 [1961]) com a introdução da hipótese, inspirada na obra tardia de Schrödinger (1967 [1944], 1964),

¹⁷⁵ No original: “*In the development of theoretical physics during the second quarter of this century one can recognize, I believe, the influence of a particular view of the world which could be called ‘rational mysticism’ [...] the ‘existent’ is a whole, and its unity can be apprehended intuitively*”.

¹⁷⁶ No original: “*The Vedanta psychology is founded upon the experimentally verifiable insight that the Brahman-Atman is the sole Reality, and its primary concern is to provide a pragmatic explanation as to “why” man fails to realize his basic and supreme identity with Brahman. In general, man’s blind acceptance of dualisms and distinctions is the ignorance (avidya) that lands him squarely in a world of illusions (maya)*”.

chamada de “visão Vedantina”¹⁷⁷ (cf. Bass, 1971, p. 58), que remete à tese da *unicidade da consciência*.

Para tal raciocínio, Bass (1971, p. 56, ênfase nossa) propõe as seguintes premissas:

A. Meu corpo, com seu sistema nervoso central (explorado em qualquer grau de completude fisiológica) funciona *puramente como um mecanismo*, de acordo com as leis da natureza. Além disso, a mecânica quântica é a base final desse mecanismo.

B. Estou ciente, por evidência direta incontestável, do conhecimento (informação) entrando em *minha consciência*.¹⁷⁸

Se aceitarmos que exclusivamente a premissa “A” se aplica ao “observador *intermediário*”, então tal observador seria, para os efeitos de *medição*, tal como um *aparelho medidor* (cf. Wigner 1983 [1961], p. 177), isto é, seria incapaz de completar uma medição conforme o sentido do termo “medição” proposto por von Neumann (1955 [1932]); da mesma forma, se aceitarmos que exclusivamente a premissa “B” se aplica ao “observador *intermediário*”, então tal observador seria, para os efeitos de *medição*, um observador *final* (cf. Wigner 1983 [1961], p. 176) na medida em que seria capaz de completar uma medição.

As duas premissas, quando aplicadas juntamente ao observador *intermediário*, trariam uma situação paradoxal visto que levam a situações mutuamente exclusivas. Essa seria a leitura de Bass (1971, p. 57) do paradoxo da *amiga de Wigner* (1983 [1961]). No entanto, o raciocínio acima parece levar em consideração *dois observadores*, nomeadamente o *observador intermediário* e o *observador final*. Assim, Bass (1971, p. 58) é capaz de enunciar uma *terceira premissa subentendida* no raciocínio que leva à

¹⁷⁷ No original: “Vedantic view”.

¹⁷⁸ No original: “A. My body with its central nervous system (explored to any future degree of physiological completeness) functions as a pure mechanism according to the laws of nature. Furthermore, quantum mechanics is the ultimate basis of the mechanism. B. I am aware, by incontrovertible direct evidence, of knowledge (information) entering my consciousness”.

situação paradoxal: “C. Existem, independentemente, ao menos duas mentes conscientes”¹⁷⁹.

No entanto, Bass (1971, p. 58-61) procura demonstrar que a situação paradoxal proposta por Wigner (1983 [1961]) só ocorre quando as premissas A, B e C são aceitas, de modo que, se somente a premissa “C” for negada, as premissas “A” e “B” podem ser ambas verdadeiras ao mesmo tempo. Para tanto, uma hierarquia das três premissas, do ponto de vista empírico, é estabelecida por Bass (1971, p. 59): “mantenho, como Descartes, que a premissa “B” é a mais forte dentre as três: não tenho conhecimento mais direto e menos incerto que esse”¹⁸⁰.

A premissa “A” estaria em segundo lugar na “hierarquia empírica” de Bass (1971, p. 59), e é analisada criticamente: a primeira parte da premissa “[...] extrapola os avanços maravilhosos e contínuos da fisiologia do sistema nervoso”¹⁸¹, mas que, ainda assim, permanece válida na medida em que a neurofisiologia não nega que o cérebro é “uma rede de unidades de operação eletroquímicas finamente interligadas (células, axônios, sinapses)”¹⁸²; já a segunda parte da premissa seria mais suscetível a críticas, na medida em que pressupõe uma “total confiança nos princípios da mecânica quântica ortodoxa”¹⁸³; ainda assim, tal fato não invalidaria a premissa tendo em vista o caráter essencialmente efêmero de todas as teorias físicas. Ademais, por mais que a mecânica quântica não seja a *última teoria física* – que, na atualidade seriam as teorias quânticas de campo (cf. Arenhart, Krause, 2012, p. 49) –, sua capacidade de previsão é inegavelmente eficaz, de modo que ainda não tem sido negada em sua totalidade.

Na análise da premissa “C”, Bass (1971, p. 59) afirma que não é apoiada por qualquer evidência empírica direta”¹⁸⁴, utilizando-se do raciocínio de Schrödinger

¹⁷⁹ No original: “C. *There exist at least two independent conscious minds*”.

¹⁸⁰ No original: “*I maintain, following Descartes, that premiss B is the strongest of the three: I have no knowledge more direct and less uncertain than that*”.

¹⁸¹ No original: “*extrapolates the marvellous and continuing advances of the physiology of the nervous system*”

¹⁸² No original: “*a network of finely interconnected electrochemical operating units (cells, axons, synapses)*”.

¹⁸³ No original: “*total reliance on the tenets of orthodox quantum mechanics*”.

¹⁸⁴ No original: “*it is supported by no direct empirical evidence whatever*”.

(1967 [1944], p. 88), para quem “‘consciência’ nunca é experienciada no plural, apenas no singular”¹⁸⁵ – o que Bass (1971, p. 60) considera suficiente para afirmar que a premissa “C” seria *a premissa mais fraca dentre as três, do ponto de vista empírico*.

Por outro lado, do ponto de vista *lógico*, Bass (1971, p. 60, ênfase nossa) aponta que a atualização de uma potencialidade, no caso de uma medição efetuada pela consciência deveria representar “um *efeito específico* da consciência sobre o mundo físico”¹⁸⁶, de modo que seja precisamente “[...] *este efeito específico* da consciência sobre o mundo físico que pode ser tomado para acoplar a introspecção [premissa B] na física [premissa A], de modo a gerar o paradoxo”¹⁸⁷. Tal “efeito específico” seria a ação da premissa “C”, isto é, a ação de uma (dentre uma vasta pluralidade) *consciência individualizada* sobre o mundo físico.

Assim, Bass (1971, p. 60) resume seu argumento da negação da premissa “C” da seguinte forma: “[a faculdade de] introspecção (na premissa B) pode envolver apenas uma consciência. O mundo externo (na premissa A) é introduzido e confrontado com a introspecção de tal modo que a hipótese sobre a pluralidade das mentes conscientes (na premissa C) resulta em uma negação”¹⁸⁸.

Desta forma, Bass (1971, p. 63) assume a “[...] visão vedantina, que nega a pluralidade das mentes conscientes”¹⁸⁹ A *existência* da pluralidade da consciência, contudo, não é negada em absoluto: ela existiria enquanto *aparência*, referindo a doutrina indiana de *māyā*, isto é, da *aparência* da pluralidade das consciências, à medida em que *realmente* só existiria uma consciência (cf. Bass, 1971, pp. 61-62). No entanto, Bass (1971, p. 65) reconhece que a emergência de uma dualidade sujeito/objeto, tal como parece ocorrer na percepção humana, é um aspecto problemático de sua proposta:

¹⁸⁵ No original: “consciousness is never experienced in the plural, only in the singular”.

¹⁸⁶ No original: “a specific effect of consciousness upon the physical world”.

¹⁸⁷ No original: “[...] this specific effect of consciousness on the physical world which may be taken to couple introspection to physics so as to generate the paradox”.

¹⁸⁸ No original: “Introspection (in premiss B) can involve only one consciousness. The external world (in premiss A) is introduced and confronted with introspection in such a way that a hypothesis about plurality of conscious minds (in premiss C) is denied as a result”.

¹⁸⁹ No original: “[...] Vedantic view that denies the plurality of conscious minds”.

Assumindo a pluralidade, deduzi uma contradição. Seria desejável complementar tal resultado ao assumir a unidade e deduzir uma consequência específica que possa ser, ao menos em princípio, observável. Isso asseguraria que a distinção entre pluralidade e unidade é significativa até mesmo no âmbito das ciências naturais. Mas a noção ordinária de um ato de observação envolve um sujeito e um objeto, o que não se coaduna com a hipótese da unidade, quando ambos sujeito e objeto envolvem consciência.¹⁹⁰

A dualidade sujeito/objeto no ato de observação, referida acima, é mais sutil do que a referida por Bohr (1983 [1928]): há implícita aqui uma distinção entre aquilo que *conhece* e aquilo que é *conhecido*. Mantendo o vocabulário monista da consciência proposta por Bass (1971), há a distinção entre o que está *dentro da consciência* e o que está *fora da consciência*. Tal tema da *dualidade*, isto é, a *multiplicidade* de consciências *subsidiária ao monismo*, à unicidade da consciência, *seria*, à luz do Vedanta, *abordado pela doutrina da ilusão* (cf. Radhakrishnan, 1914).

Portanto, longe de solucionar os problemas da consciência na mecânica quântica, essa hipótese daria lugar a outro espectro de problemas conceituais, próprios do pensamento vedantino. Ainda assim, essa atitude frente ao problema da medição quântica é levada adiante pelo físico Amit Goswami (1989; 2003 [1992]; 2001a, 2001b). Apresentaremos *resumidamente* a proposta goswamiana para a interpretação da *medição quântica* nos parágrafos seguintes. Um estudo aprofundado do pensamento de Goswami pode ser encontrado em Martins (2009).

A partir de uma generalização da ontologia de Heisenberg (1958) acerca da distinção entre *potencialidade* e *atualidade* – que, por sua vez, se utiliza da filosofia aristotélica –, Goswami (1989; 2003 [1992], p. 534) afirma que a evolução determinista e temporal, descrita através do processo 2, ocorre em um *domínio transcendente*, que define – utilizando a terminologia de Heisenberg (1958) – como “*potentia*”.

¹⁹⁰ No original: “Assuming plurality, I have deduced a contradiction. It would be desirable to complement this result by assuming oneness and deducing a specific consequence which might be observable at least in principle. This would ensure that the distinction between plurality and oneness is meaningful even in the sense of natural science. But the customary notion of an act of observation involves a subject and an object, and these do not fit in with the hypothesis of oneness when both subject and object involve consciousness”.

A definição de Goswami (1989, 2003 [1992], p. 534) para o domínio “*potentia*”, transcendente, seria também remanescente da ontologia processual do filósofo Alfred North Whitehead (1978 [1928], 2011 [1925], p. 202, nota 2), que considera que “espaço e tempo precisam resultar de algo em processo que transcenda os objetos”¹⁹¹.

Outra motivação para tal definição seria a interpretação de Henry Stapp – que também utiliza a filosofia de processos whitehediana para interpretar a teoria quântica, (cf. Stapp 2007a, 2007b) – acerca da não localidade (*nonlocality*). A não localidade surgiu originalmente do raciocínio EPR (1983 [1935]), que propõe um experimento mental¹⁹² em que a medição efetuada em um objeto A influenciaria instantaneamente um objeto B, espacialmente distante¹⁹³. De acordo com Stapp (1977, p. 191), a principal mensagem da não localidade seria a de que “os processos fundamentais do espaço-tempo estão fora do espaço-tempo, mas geram eventos que podem ser localizados no espaço-tempo”¹⁹⁴. Assim, Goswami (2003 [1992], p. 534) utiliza o termo “não localidade” como “fora do espaço-tempo”, de modo que o domínio “*potentia*” seja *não local*.

Aplicando tal aspecto, que Goswami (2003 [1992], p. 535) chama de “ontologia básica de Heisenberg”¹⁹⁵, à teoria da medição de von Neumann (1955 [1932]), tem-se que a medição (processo 1) *atualiza*, isto é, *traz para a realidade manifesta, apenas uma possibilidade dentre diversas outras possibilidades contidas em tal domínio*

¹⁹¹ No original: “*space and time must result from something in process which transcends objects*”. Compreendemos que é impossível exprimir a ontologia de processos de Whitehead através de uma única citação; retomaremos esse assunto adiante.

¹⁹² Sob a forma de um paradoxo, de modo a contestar a interpretação de Copenhague da mecânica quântica, vide o capítulo 2.

¹⁹³ O estudo sobre a “não localidade” fora desenvolvido posteriormente pelo físico John Bell (1964, 1966), e posteriormente ganhou respaldo experimental com os trabalhos do físico Alain Aspect em conjunto com Jean Dalibard e Gérard Roger (cf. Aspect *et al*, 1982). A não localidade é um dos aspectos da física quântica que difere radicalmente da física clássica, e tem suscitado diversos debates filosóficos até a contemporaneidade – que não serão tratados aqui. Limitamos-nos, no segundo capítulo, em analisar o problema da *separabilidade*, o qual a “não localidade” é subalterna (cf. Murdoch, 1994). Um debate mais amplo e aprofundado sobre as implicações filosóficas da *não localidade* pode ser encontrado no livro editado por Cushing e McMullin (1989).

¹⁹⁴No original: “*the fundamental processes of space-time lie outside of space-time but generate events which can be located in space-time*”.

¹⁹⁵ No original: “*Heisenberg’s basic ontology*”.

transcendente, de modo que a *realidade transfenomenal*, isto é, a realidade entre tais *atualizações* estaria contida no domínio “*potentia*”.

O termo “metafísica experimental”, cunhado pelo físico e filósofo Abner Shimony (1984, p. 35), expressa a ideia de que os experimentos científicos poderiam, de alguma forma, guiar os debates metafísicos, e até mesmo ontológicos, isto é, de visões de mundo. Goswami (2001a, p. 15-16) se utiliza desse conceito para exemplificar, a partir de um experimento conduzido em conjunto com o neurofisiologista Jacobo Grinberg-Zylberbaum e seus colaboradores, Delaflor e Attie (cf. Grinberg-Zylberbaum *et al*, 1994), a ação não local da consciência unitiva.

No experimento em questão, duas pessoas são separadas em salas com isolamento eletromagnético (isto é, que não permitem a transmissão de sinais eletromagnéticos) e conectadas a eletroencefalogramas diferentes. Solicita-se que, durante o experimento, as pessoas mantenham a *intenção* de comunicar-se entre si. Uma série de flashes de luz é lançada em uma das salas, de modo que apenas uma das pessoas poderia tê-los visto. As ondas cerebrais da pessoa que viu os flashes são registradas pelo eletroencefalograma, com uma atividade elétrica no cérebro que atinge picos nos momentos em que os flashes são disparados – o que é nomeado de “potencial evocado” (GRINBERG-ZYLBERBAUM *et al*, 1994, p. 423).

No entanto – e essa é, segundo Goswami (2001a, p. 201), a maior contribuição de tal experimento –, *a outra pessoa, que não viu os flashes, também tem uma atividade cerebral registrada*, precisamente nos mesmos instantes (mas com uma intensidade menor) em que o potencial evocado ocorre – o que é chamado de “potencial transferido”¹⁹⁶ (GRINBERG-ZYLBERBAUM *et al*, 1994, p. 424). Em experimentos controle, as pessoas não mantêm a intenção de se comunicarem ao longo do experimento, e o potencial transferido não foi observado.

Goswami (2001a, p. 202) sugere que a explicação de tal fenômeno seja a *ação não local da consciência unitiva*, que “[...] colapsa estados similares nos dois cérebros;

¹⁹⁶ No original: “transferred potential”.

daí a similaridade dos potenciais cerebrais”¹⁹⁷. Assim, da mesma forma que no raciocínio EPR (1983 [1935]), os dois cérebros estariam de alguma forma *inseparáveis* de maneira *não local*, com a diferença crucial de que, no caso do experimento conduzido por Grinberg-Zylberbaum (*et al*, 1994) tal *inseparabilidade* se daria por uma *intenção consciente* e não por um ato puramente físico (cf. Goswami, 2001a, p. 202).

Um dos aspectos essencialmente *novos*¹⁹⁸ da interpretação de Goswami (1989, p. 385; 2003 [1992], p. 535) seria a proposta ontológica do “idealismo monista”¹⁹⁹²⁰⁰, na qual *todos os elementos estão dentro da mesma e única consciência*: tanto os elementos transcendentais, potenciais, quanto os imanentes, atualizados. Isto é, tanto o processo 1 quanto o processo 2 acontecem *dentro da consciência*. Nas palavras de Goswami (2003 [1992], p. 536):

[...] os objetos já estão na consciência primordialmente, como formas possíveis em *potentia*. O colapso não está fazendo algo aos objetos via observação, mas consiste em escolher entre as possibilidades alternativas que a função de onda fornece, e em reconhecer o resultado da escolha²⁰¹.

Isto é, não se trataria da *ação da consciência sobre a matéria*, isto é, de *mover algum corpo material com a força do pensamento*, algo como a *psicocinese* ou a *telecinésia*. Essa ideia pressupõe uma cisão dualista entre as noções de “consciência” e “matéria”. O que parece estar em jogo aqui é o postulado de que todos os objetos são objetos dentro da mesma e única consciência. Essa seria uma forma de tratar a noção de consciência a partir de uma ontologia outra que não a do *monismo materialista* – onde

¹⁹⁷ No original: “[...] collapses similar states in the two brains; hence the similarity of the brain potentials”.

¹⁹⁸ Na realidade, seria uma proposta “nova” em relação à interpretação da mecânica quântica, na medida em que Goswami (cf. 1989; 2003 [1992], p. 535) utiliza de vários aspectos metafísicos da filosofia platônica.

¹⁹⁹ No original: “*monistic idealism*”.

²⁰⁰ Como veremos, o termo corresponde àquilo que Conger (1944, p. 239) chamou de “monismo espiritualista”. Dentre os autores *ocidentais* – região *vagamente* delineada como a Europa, as Américas, a Ásia e a Palestina (cf. Conger, 1944, p. 235) – que advogam essa corrente de pensamento, Conger (1944) destaca os nomes de Platão, Plotino e Espinoza, principalmente.

²⁰¹ No original: “[...] objects are already in consciousness as primordial, possibility forms in *potentia*. The collapse is not about doing something to the objects via observing, but consists of choosing among the alternative possibilities that the wave function presents and recognizing the result of choice”.

a consciência é um fenômeno advindo da complexidade do arranjo material (neuronal), portanto sem poder causal – ou a do *dualismo* – onde as noções de “consciência” e “matéria” correspondem a substâncias separadas.

Da mesma forma, Goswami (2003 [1992], p. 536) procura demonstrar de que forma a noção de consciência, quando tratada a partir do idealismo monista, evita dificuldades filosóficas conforme apontadas em situações tais como a da “amiga de Wigner”:

O problema de Wigner surge do seu raciocínio dualista acerca da sua própria consciência separada da consciência de sua amiga. O paradoxo desaparece se existir somente um sujeito – não sujeitos separados como estamos acostumados a pensar. [...] Se a consciência da amiga de Wigner não difere em essência da consciência de Wigner, se for sempre uma consciência causando o colapso da função de onda, não há paradoxo.²⁰²

Essa proposta de solução para a situação elaborada por Wigner (1983 [1961]), através do “paradoxo da amiga”, é muito próxima da solução proposta por Bass (1971), como vimos anteriormente. Revisitando a situação do gato de Schrödinger (1983 [1935]), expandida por Penrose (1989), Goswami (1989, p. 390) afirma que questões acerca da *consciência do gato* ou a discrepância entre os humanos de dentro e fora da caixa são dificuldades que acompanham a concepção dualista da noção de “consciência”:

Quando eu observo [um fenômeno], o que eu vejo é o mundo das aparências, mas isso não é solipsismo. Porque não há um “eu” individual que vê, em oposição aos outros “eus”. Nós caímos em uma armadilha dualista ao pensar sobre “minha” consciência devido ao uso da palavra “eu”, que deve ser considerada como puramente uma convenção lingüística, e não literalmente. (Similarmente, as pessoas acabam por pensar em *ter*

²⁰² No original: “Wigner’s problem arises from his dualistic thinking, his consciousness separate from his friend’s. The paradox disappears if there is only one subject – not separate subjects as we are use to thinking. [...] If Wigner’s friend’s consciousness is in essence no different from Wigner’s, if it is always one consciousness collapsing the wave function, there is no paradox”.

consciência, como na questão sobre “o gato tem consciência?” Mas na verdade, consciência é algo que pode ser possuído somente no realismo materialista, isto é, somente se fosse um epifenômeno.)²⁰³

No entanto, Goswami (1989, 2003 [1992], p. 537) aponta uma dificuldade para essa solução do problema da medição: se admitirmos que a consciência, unitiva e transcendente, traz à *atualidade manifesta* alguns aspectos *da sua própria potencialidade transcendente*, ela seria onipresente. No entanto, se aceitarmos tal uso do termo “consciência”, ela estaria *sempre observando*, de modo que caberia a pergunta: a que ponto uma medição está completa? Isto é, como poderia haver mais do que uma medição se a consciência onipresente estaria continuamente *medindo*? Desta forma, a simples introdução da hipótese de uma consciência onipresente como agente causal na medição quântica não resolveria o problema da medição.

Na tentativa de resolver tal dificuldade, Goswami (1989, 2003 [1992], p. 537) afirma que “*a medição não está completa sem a inclusão da percepção auto-referencial mente-cérebro*”²⁰⁴, o que implicaria numa circularidade causal na medida em que “*a percepção é necessária para completar a medição, mas sem que uma medição esteja completa, não há percepção*”²⁰⁵. Goswami (1993, p. 99; 2003 [1992], p. 537) afirma que é dessa auto-referência que surge a percepção subjetiva, como um epifenômeno da experiência.

Tais ideias acerca do funcionamento auto-referencial entre mente-corpo teriam sido inspiradas na obra de Douglas Hofstadter (1979) (cf. Goswami, 1993, p. x). Resumidamente, Hofstadter (cf. 1979, pp. 684-714) considera que uma das características da auto-referência – tal como apontada pela noção de incompletude de

²⁰³ No original: “*When I observe, what I see is the whole world of appearance, but this is not solipsism. Because there is no individual “I” that sees, as opposed to other “I”s. We fall into the dualistic trap of thinking about “my” consciousness because of the use of the word I, which must be thought of purely as a linguistic convenience and must not be taken literally. (Similarly, people fall into thinking about having consciousness, such as in the question, does a cat have consciousness? But really, consciousness is something to be possessed only in material realism, only if it were an epiphenomenon.)*”.

²⁰⁴ No original: “*the measurement is not complete without the inclusion of a self-referential mind-brain-awareness*”.

²⁰⁵ No original: “*awareness is needed to complete the measurement, but without the completion of measurement, there is no awareness*”.

Gödel (1931) – seria a emergência de um meta-nível que a transcenda; em sua terminologia, afirma que a auto-referência ou “loop” forma uma “hierarquia entrelaçada”²⁰⁶, da qual um “nível inviolado”²⁰⁷ emerge. Para Hofstadter (cf. 1979, p. 688), tais níveis são hierárquicos, de modo que o nível inviolado governa o que acontece no nível entrelaçado, mas o nível entrelaçado não pode afetar o nível inviolado.

Na terminologia de Goswami (1993, p. 192), a *consciência* seria análoga ao “nível inviolado”, que governa o aparelho *mente-corpo* auto-referente, ou em “hierarquia entrelaçada”. No entanto, próprio do *nível inviolado*, a definição de “consciência”, para Goswami (2001a, p. 14), fugiria aos critérios discursivos:

O que é a consciência? Podemos começar a discussão com o que não é. Não é uma parte da dualidade mente-matéria, interno-externo. Não é um objeto, embora objetos apareçam nela. Tem algo a ver com o subjetivo, o experienciador, o conhecedor de objetos. [...] Porque a consciência é a base do ser, tudo mais, incluindo palavras, conceitos e metáforas, são secundários a ela. Não podemos definir a consciência completamente com itens que são secundários a ela, acentuando o mistério.²⁰⁸

Poderíamos, talvez, delinear certa influência da filosofia platônica no pensamento de Goswami (2001a, p. 14) acerca da (in)definição do termo “consciência” na medida em que, para Platão (*República*, VI, 509d-511e), a *razão discursiva* (do grego “*dianóia*”) não seria suficiente para apreender os níveis metafísicos mais elevados, tal como a suprema Ideia de Bem ou Sumo Bem. Maria Pereira (1990, pp. XXIX-XXX) comenta tal aspecto da metafísica platônica da seguinte maneira:

²⁰⁶ No original: “*tangled hierarchy*”.

²⁰⁷ No original: “*inviolable level*”.

²⁰⁸ No original: “*What is consciousness? We can start the discussion with what it is not. It is not part of the mind-matter, internal-external, duality. It is not an object, although objects appear in it. It has also to do with the subject, the experiencer, the knower of objects. [...] Because consciousness is the ground of being, all else, including words, concepts, and metaphors, are secondary to it. We cannot define consciousness completely with items that are secondary to it, accentuating the mystery*”.

[...] o mundo visível (*horata* ou *doxasta*) tem em primeiro lugar uma zona de *eikones* (“imagens”, ou, como outros preferem, “ilusão”). Num nível mais elevado, temos todos os seres vivos (*zoa*) e objetos do mundo, conhecidos através de *pistis* (fé). O mundo inteligível (*noeta*) tem também dois sectores proporcionais a estes, o inferior e o superior, o primeiro apreendido através da *dianóia* (“entendimento” ou “razão discursiva”) e o segundo só pela *nóesis* (“inteligência” ou “razão intuitiva”).

Em seu dicionário etimológico do vocabulário filosófico grego, Ivan Gobry (2007, p. 41) reitera tal ideia:

Esse termo [*dianóia*] tem sentido vago; indica habitualmente um modo de pensamento menos elevado que a *nóesis*. Classicamente, a *diánoia* é o conhecimento discursivo, por raciocínio. Assim, em Platão, ela é o grau inferior da ciência, que recorre a conceitos em vez de contemplar diretamente as Essências (v. *dialektiké, psykhé*).

Ademais, há na metafísica platônica considerações que pressupõem a conexão entre as noções de “unidade” e a “Ideia de Bem” (*República*, VII, 519d-521b), o que atenua a possibilidade de um paralelo com a noção de “consciência” em Goswami (1989, 2001a, explicitamente em 2001b, p. 536).

Além da influência na filosofia grega, da mesma forma que Schrödinger (1967 [1944], 1964) em seu pensamento tardio, o pensamento de Goswami (2001a, p. 14) é claramente influenciado por diversos aspectos do referencial oriental, principalmente no que se refere à unidade²⁰⁹ com o nível metafísico mais elevado (a saber, a *consciência unitiva*):

Mas, dizem os sábios espirituais, os descobridores da filosofia monista idealista, embora não possamos defini-la, podemos sê-la, nós somos ela. É nossa ignorância que nos impede de ver nossa natureza original, nossa interconectividade com a fonte.²¹⁰

²⁰⁹ Um estudo comparativo aprofundado das influências de Goswami no pensamento indiano pode ser encontrado tese de doutorado de Paulo Martins (2009).

²¹⁰ No original: “But, say the spiritual sages, the discoverers of the monistic idealist philosophy, although we cannot define it, we can be it, we are it. It is our ignorance that is preventing us from seeing our original nature, our interconnectedness with the source”.

As propostas de solução ao problema do dualismo analisadas acima pressupõem o uso do referencial filosófico indiano²¹¹ (se é que tal expressão faz algum sentido) – o que ainda é bastante polêmico na prática científica e filosófica do ocidente. Uma das principais dificuldades de utilizar a sabedoria do vasto oriente para compreender o uso da noção de “consciência” na mecânica quântica é que várias vertentes do pensamento indiano, tal como o Vedanta, pressupõem a experiência mística (se é que tal expressão faz algum sentido), isto é, parece fugir do escopo de investigação limitado pelo discurso racional da ciência e pela filosofia.

Desta forma, na medida em que fazem uso referencial do Vedanta, as soluções de Bass (1971) e Goswami (1989, 1993, 2003 [1997], 2001a, 2001b), bem como o pensamento tardio de Schrödinger (1967 [1944], 1964), a despeito de sua plausibilidade, deveriam ser, no mínimo, precedidas por uma discussão acerca da legitimidade do uso da sabedoria oriental como referencial ontológico para as ciências empíricas, como a mecânica quântica – o que não será feito aqui.

Ainda assim, a filosofia processual do filósofo Alfred North Whitehead (1978 [1928]) tem aberto um frutífero campo de investigação para os estudos da consciência frente às dificuldades da noção de consciência frente ao dualismo e sua relação com a mecânica quântica, como apontam os estudos de Eastman e Keeton (2003), Epperson (2004), Stapp (2007a, 2007b), Weber e Weekes (2009) – o que pode indicar um campo para investigação futura de modo a possivelmente oferecer uma solução melhor aceita pelas comunidades científica e filosófica.

²¹¹ Para finalizar esta investigação, referimos a proposta do físico Efstratios Manousakis (2006), que oferece um modelo em que a teoria quântica é fundada sob a base ontológica da consciência sem referir ao pensamento indiano. Pode-se constatar diversos pontos em comum com a proposta de Goswami (1989): para Manousakis (2006, p. 800), a *consciência* tem caráter unitivo e é a base ontológica de sua metafísica; há apenas *uma única consciência*, que nomeia de “fluxo Universal da consciência”; no original: “*Universal stream of consciousness*”, do qual emergem os “sub-fluxos”; no original: “*sub-streams*”, tais como as individualidades ou “fluxo individual da consciência”; no original: “*individual stream of consciousness*”.

3.4 Abordagens populares frente ao conceito de “medição”

Existem inúmeras atitudes frente ao problema que procuramos delinear ao longo do trabalho, o *problema da medição*. Um exame histórico-conceitual mais abrangente sobre as diversas abordagens para o problema da medição pode ser encontrado em Pessoa Junior (1992). Dentre as diversas abordagens, destacaremos cinco atitudes frente ao problema com base no critério de sua popularidade na comunidade científica contemporânea.

Selecionamos nesta seção algumas leituras com base na repercussão que tiveram, a título de amostragem. Deve ficar claro que tal *não seria possível aprofundar, em apenas uma dissertação, a discussão acerca de todas as interpretações referidas nesta seção*. Cada uma delas mereceria um estudo à parte para que se pudesse apresentar sua riqueza e complexidade; limitamo-nos a apresentá-la muito brevemente, a título de amostragem, como interpretações possíveis dentre as mais influentes e/ou populares. Desta forma, nos limitaremos a uma abordagem bastante resumida e superficial, indicando bibliografias que possam aprofundar a discussão.

As atitudes frente à noção de “medição” foram selecionadas de forma a exemplificar como o problema não é abordado de forma unilateral, isto é: a interpretação da consciência, conforme proposta por von Neumann (1955 [1932]) – assim como suas extensões ontológicas (cf. London, Bauer, 1983 [1939]; Wigner, 1983 [1961]; Bass, 1971; Goswami, 1989) – não são necessárias. Um *catálogo* bastante abrangente acerca das interpretações da mecânica quântica pode ser encontrado no estudo de Max Jammer (1974).

As leituras selecionadas, que serão divididas em sub-seções, são, cronologicamente: a *interpretação estatística* que, assim como a interpretação de Copenhague, também é amplamente aceita pela comunidade científica²¹² e frequentemente utilizada em diversos livros-texto de mecânica quântica (cf. Pessoa

²¹² Pessoa Junior (2006, p. 110) destaca que a interpretação estatística vem ganhando força como uma interpretação hegemônica especialmente no Brasil.

Junior, 2003 p. 25, nota 13); a interpretação causal de David Bohm (1952, 1980; Bohm e Hiley, 1993), por se tratar de uma abordagem heterodoxa bastante completa (cf. d’Espagnat, [1979] 1983); a interpretação dos estados latentes, abordagem crítica de Henry Margenau (1954, 1958, 1963) frente ao processo 1, isto é, frente ao aspecto descontínuo – o *colapso* – da medição quântica, bem como sua atitude crítica frente às interpretações *subjetivas*, que Jammer (1974) destaca como influente; a interpretação dos estados relativos do físico Hugh Everett III (1983 [1957]) por ser uma das abordagens heterodoxas mais populares (cf. Osnaghi, 2008, p. 157); a abordagem do colapso espontâneo dos físicos Ghirardi, Rimini, e Weber (1985, 1986) – doravante GRW – por ser uma das atitudes mais bem aceitas na comunidade científica contemporânea (cf. Albert, 1992; Maudlin, 2003).

Com exceção das formulações “GRW” e “estatística”, todas as outras atitudes destacadas adiante negam a validade do processo 1, isto é, do *colapso*, se enquadrando nas chamadas “teorias sem colapso” (do inglês “*no-collapse theories*”).

3.4.1 A interpretação estatística

Iniciaremos com a *interpretação estatística* ou “interpretação dos coletivos estatísticos” (cf. Pessoa, 2003, p. 24), do inglês “*ensemble interpretation*”. Ballentine (1970, p. 360) distingue as interpretações da teoria quântica em dois grupos maiores: as interpretações nas quais a mecânica quântica provê uma descrição completa e exaustiva sobre sistemas *individuais* e as interpretações nas quais a mecânica quântica provê uma descrição completa e exaustiva sobre sistemas *coletivos*. A mesma oposição é feita por Jammer (1974, p. 440). As interpretações do primeiro tipo são consideradas interpretações *ortodoxas* e as do segundo tipo são consideradas *interpretações estatísticas* ou *ensemble interpretations*. A noção de “coletivos estatísticos” ou “*ensemble*” remete a um grupo *imaginário* de diversos sistemas possíveis com a mesma estrutura macroscópica e o mesmo sistema microscópico em questão a ser *medido*.

É notável que a maneira como Ballantine (1970) define a noção de interpretação “*ortodoxa*” da teoria quântica tem um significado distinto e mais abrangente do que aquele que utilizamos ao longo deste trabalho. Até aqui, a noção de “interpretação *ortodoxa*” tem correspondência exclusiva com a formulação de Copenhague. Segundo a formulação de Ballantine (1970), no entanto, até mesmo a interpretação de von Neumann (1955 [1932]) seria entendida como uma atitude *ortodoxa*. De fato, Ballantine (1970) considera von Neumann o fundador da *escola de Princeton* – que Withaker (1996, p. 194) chama de *interpretação de Princeton da mecânica quântica*, em oposição à *interpretação de Copenhague da mecânica quântica* – e afirma que “ambas reivindicam ortodoxia”²¹³ (BALLANTINE, 1970, p. 360).

No entanto, como procuramos expor, essas duas interpretações ditas *ortodoxas* têm suas dificuldades no âmbito filosófico. Seja a necessidade de uma ontologia (O1) para abarcar a noção de um *observador* para causar a medição na interpretação de Princeton, ou a prioridade ontológica dos objetos clássicos na medição da interpretação de Copenhague (cf. Home, Whitaker, 1996, p. 262).

O fato de evitar os paradoxos e os problemas filosóficos da teoria quântica seria uma das três motivações principais que Home e Whitaker (1992, p. 262, 264, 311) destacam para a adoção das interpretações *estatísticas*. Proposta por Einstein em 1927, na ocasião da 23ª Conferência de Solvay, tal interpretação fora formulada, de acordo com Jammer (1974, p. 440), para “[...] evitar as dificuldades conceituais que surgem se a redução de uma função de onda é descrita em termos de uma interpretação que associe funções de onda com sistemas individuais”²¹⁴, isto é, foi idealizada para justamente evitar praticamente todas as dificuldades filosóficas discutidas neste trabalho – quiçá todas as dificuldades filosóficas da mecânica quântica – que surgem do tratamento de *sistemas individuais*.

²¹³ Tradução nossa. No original, “*both claim orthodoxy*”.

²¹⁴ No original: “[...] *avoid the conceptual difficulties which arise if the reduction of a wave packet is described in terms of an interpretation which associates wave functions with individual systems*”.

Outra motivação destacada por Home e Whitaker (1992, p. 262) seria a de reduzir a teoria a uma ontologia *realista*, isto é, manter na mecânica quântica nossas percepções intuitivas acerca da realidade que nos cerca. Como destaca Putnam (2005, p. 624), essa motivação seria compartilhada por Einstein e, talvez, o fato da interpretação de Copenhague oferecer uma visão *contra-intuitiva* do mundo à nossa volta seria um dos motivos para que o físico tivesse tantas objeções a essa interpretação. Putnam (2005, p. 624) relata uma conversa que manteve com Einstein no ano de 1953 na qual afirma, em paráfrase, que este pesquisador havia dito algo como “olha, eu não acredito que quando não estou no meu quarto minha cama se espalha por todo o cômodo, e sempre que eu abro a porta e entro ela salta novamente para o canto”²¹⁵ (EINSTEIN *apud* PUTNAM, 2005, p. 624), o que ele chama de “*problema da cama de Einstein*”²¹⁶.

No entanto, Fine (1990, p. 968) declara que “até onde eu pude descobrir [...] Einstein não oferece em lugar algum uma descrição detalhada da [...] interpretação estatística”²¹⁷. Ainda assim, a despeito da falta de uma formulação textual detalhada, diversos físicos teriam se utilizado das ideias de Einstein sobre *ensembles* para criar propostas estatísticas para a mecânica quântica (cf. Home, Whitaker, 1992).

Há, no entanto, uma grande variedade de abordagens estatísticas para a interpretação da mecânica quântica, com diferentes nomes e especificidades (cf. Home, Whitaker, 1992, p. 285), e não há consenso sobre exatamente *qual* interpretação Einstein teria endossado. Contudo, como procuramos enfatizar, o comprometimento ontológico com uma realidade independente acaba por sugerir que Einstein endossaria um tipo de interpretação estatística na qual “em todos os instantes, todas as variáveis possuem valores, passíveis de serem *descobertos* em

²¹⁵ No original: “look, I don’t believe that when I am not in my bedroom my bed spreads out all over the room, and whenever I open the door and come in it jumps into the corner”.

²¹⁶ Tradução nossa. No original, “*problem of Einstein’s bed*”.

²¹⁷ No original: “so far as I have been able to discover [...] Einstein nowhere offers a detailed account of the [...] *ensemble interpretation*”.

medições”²¹⁸ (HOME WHITAKER, 1992, p. 263, ênfase nossa), de modo que todo indeterminismo se dê pelo desconhecimento de todas as variáveis envolvidas no processo de medição. Tais variáveis seriam as *variáveis ocultas*²¹⁹, isto é, são *criptodeterministas* (cf. Pessoa Junior, 1992) no sentido de um *indeterminismo epistemológico subjacente a um determinismo ontológico*.

Para Ballantine (1970), essa seria a forma mais natural de pensar a posição einsteiniana sobre *ensembles*. Essa posição se coaduna com evidência textual, que procuramos destacar, do comprometimento ontológico com uma realidade independente e pré-existente na obra de Einstein. Home e Whitaker (1992, p. 263) vão além e apontam para o fato de que, para muitos, tal interpretação seria a interpretação estatística (cf. Bunge, 1967, p. 7; Fine, 1986, p. 43).

No entanto, destacamos uma definição *mínima* para a atitude estatística, presente em *todas* as interpretações estatísticas, formulada por Gibbins (1987, p. 76). De acordo com tal definição, uma interpretação estatística considera que *uma função de onda representa um ensemble* (cf. Gibbins, 1987, p. 76), trazendo consigo a ideia de que a mecânica quântica trataria exclusivamente das estatísticas dos resultados obtidos por uma numerosa sequência de medições simultâneas de sistemas coletivos – chamada *ensemble* (cf. Pessoa Júnior, p. 187, nota 9) –, e não sobre quaisquer propriedades dos objetos físicos. Desta forma, a atitude estatística contrasta com a atitude ortodoxa, para a qual a função de onda forneceria uma descrição completa de um *sistema individual*.

De acordo com Park (1973), o conceito de *colapso* ou *redução de estado* também é rejeitado. Assim, deve ficar claro que, para a interpretação estatística, *o problema da medição quântica não existe* (cf. Farias, 1987; Home, Whitaker, 1992, p. 280). Para exemplificar a atitude *mínima* da interpretação estatística frente à situação do gato de Schrödinger (1983 [1935]), Ross-Bonney (1974, p. 22) escreve que “na interpretação

²¹⁸ No original: “at all times, all variables have values, values which are then available to be discovered in measurements”.

²¹⁹ Para um estudo detalhado das teorias de *variáveis ocultas*, ver Belinfante (1973).

estatística não há problema. A função de onda representa uma vasta gama de gatos posicionados de forma similar. Em qualquer experimento, aproximadamente metade dos gatos estão mortos [...] e metade estão vivos”²²⁰. Isto é, todo debate filosófico em torno do conceito de medição é evitado.

Comumente referida como uma interpretação *instrumentalista* da mecânica quântica (cf. Pessoa Junior, 1992, p. 200), se trata de uma interpretação puramente funcional da teoria quântica, evitando grande parte dos seus problemas filosóficos. Por esse motivo, recebe grande atenção por parte da comunidade científica. Da forma como Jammer (1974, p. 119) descreve, tal interpretação seria “mais palatável para a maioria dos físicos”²²¹. Isto é, tal interpretação evita diversos problemas filosóficos ao preço de considerar a ciência como “[...] meramente um instrumento computacional subjetivo e de modo algum uma descrição da realidade objetiva”²²² (KEMBLE, 1928, p. 328, ênfase nossa).

Esta concepção *instrumentalista*, de acordo com o que vimos anteriormente, parece conflitar diretamente com a concepção de ciência do próprio Einstein (1949a, p. 667, ênfase nossa), segundo o qual, reiteramos, uma teoria física deveria fornecer “[...] a descrição completa de qualquer situação real (e individual, que supostamente existe independentemente de qualquer ato de observação ou comprovação)”²²³. Deste modo, parece mais seguro afirmar que as interpretações estatísticas *não solucionam os problemas filosóficos nos fundamentos da interpretação da teoria quântica*, mas somente os *evitam* para fins heurísticos.

²²⁰ No original: “in the statistical interpretation there is no problem. The wave function brutally represents a vast array of similarly placed cats. In any particular experiment about half the cats are dead [...], and about half are alive”.

²²¹ No original: “more palatable to the majority of physicists”.

²²² No original: “[...] merely a subjective computational tool and not in any sense a description of objective reality”.

²²³ No original: “[...] the complete description of any (individual) real situation (as it supposedly exists irrespective of any act of observation or substantiation).”

3.4.2 A interpretação causal

A interpretação causal da teoria quântica fora apresentada pelo físico David Bohm (1952) como uma interpretação alternativa à interpretação de Copenhague. A interpretação causal, de acordo com Freire, Paty e Barros (2000, p. 124), apresentaria “os mesmos resultados já obtidos pela teoria quântica não relativista [ortodoxa], mas em uma interpretação distinta daquela usual, a da complementaridade”, distinção esta que residiria “na recuperação de certas premissas epistemológicas próprias da física clássica, como o determinismo”; ainda assim, não se tratava de uma recuperação do quadro clássico na medida em que Bohm (1952) propunha a ideia de um chamado “potencial quântico”, que seria responsável por efeitos essencialmente não clássicos como a não localidade.

A teoria de Bohm (1952) é essencialmente *determinista*, introduzindo variáveis ocultas não locais; assim, como observa Freire (2005, p. 7), “os elétrons de Bohm tem posições e momentos bem definidos; assim, eles tem trajetórias contínuas e bem definidas”²²⁴.

De acordo com Cushing (1996, p. 5, ênfase nossa) não há um “problema da medição” na medida em que o postulado do “colapso” (processo 1) não é admitido; assim, “uma partícula sempre tem uma posição definida entre medições. Não há superposição de propriedades e ‘medição [...] é uma tentativa de *descobrir* sua posição atual”²²⁵.

Fica claro que se trata de uma interpretação que se compromete com algum tipo de *realismo*, na medida em que a “medição” é considerada um ato de *revelação* de propriedades dos objetos quânticos. Bernard d'Espagnat (1983 [1979], p. 94) considera a metafísica bohmiana como um “realismo não-físico”²²⁶ justamente

²²⁴ No original: “Bohm’s electrons have well defined positions as well as momenta; thus, they have continuous and well defined trajectories”.

²²⁵ No original: “a particle always has a definite position between measurements. There is no superposition of properties and “measurement” [...] is an attempt to discover this actual position”.

²²⁶ No original: “nonphysical realism”.

porque a realidade transfenomenal dos objetos quânticos, isto é, entre observações, não corresponde à ordem física.

De acordo com Olival Freire (2015, p. 59), Bohm *abandona* a interpretação causal já nos anos 50; nos anos 80 desenvolve, com a colaboração do matemático Basil Hiley, uma interpretação *ontológica* (cf. Bohm, 1980; Bohm e Hiley, 1993). Apesar de tal mudança na concepção da interpretação da teoria quântica, Freire (2015, p. 60) aponta que “houve um comprometimento permanente com um tipo de realismo científico. [...] O determinismo, que seria a motivação da interpretação causal, foi abandonado”²²⁷.

Em sua interpretação *ontológica*, Bohm (1980; Bohm e Hiley, 1993) postula “ordens” metafísicas sutis, de modo que a *ordem física*, que nós observamos, seria chamada de “ordem explicada” (do inglês “*explicate order*”), que seria determinada por uma ordem sutil mais alta, chamada de “ordem implicada” (do inglês “*implicate order*”) – onde estariam, por exemplo, fenômenos não locais como a “consciência” (cf. Bohm, 1980, pp. 218-271; Bohm e Hiley, 1993, pp. 381-388).

No entanto, conforme expressa em uma entrevista com Renée Weber (2003 [1986], p. 140), quando questionado sobre a existência de uma “ordem super super-implicada” (do inglês “*super super-implicate order*”, Bohm respondera que “pode haver uma ordem implicada até mesmo maior do que esta [super super-implicada]”²²⁸ – o que poderia ser considerado uma dificuldade filosófica na interpretação bohmiana na medida em que as “ordens” metafísicas cada vez mais altas poderiam ser postuladas infinitamente²²⁹.

Cushing (1996, p. 6) e Freire (2015, pp. 63-64) destacam que a interpretação de David Bohm não fora aceita nas primeiras décadas desde sua formulação por motivos sociológicos, embora Freire (2015, pp. 64) aponte que tal teoria tem

²²⁷ No original: “*there was a permanent commitment to a kind of scientific realism. [...] Determinism, the leitmotif of the causal interpretation, was abandoned*”.

²²⁸ No original: “*there might be an implicate order even beyond that one*”.

²²⁹ Tal dificuldade parece se assimilar ao argumento do “terceiro homem” de Aristóteles (*Metafísica*, 990b17) que deriva uma *redução ao infinito* da *teoria das formas* platônicas, que poderiam, de acordo com a interpretação aristotélica, ser postuladas em graus metafísicos infinitamente mais altos.

conquistado prestígio e popularidade nas comunidades científica e filosófica, principalmente a partir dos anos 2000.

3.4.3 A interpretação dos estados relativos

A interpretação de Everett (1983 [1957]) da mecânica quântica, conhecida como a “interpretação dos estados relativos” (do inglês “*relative-state*”), de acordo com o filósofo Stefano Osnaghi (2008, p. 157) é uma das interpretações heterodoxas da mecânica quântica mais populares. Jeffrey Barrett (2014, p. 2) identifica tal interpretação como uma reação direta ao problema da medição, conforme enunciada por von Neumann (1955 [1932]).

Everett (1983 [1957], p. 316) apresenta tal interpretação a partir de dois postulados iniciais: a) a teoria quântica é completa *sem* o postulado do colapso, isto é, funciona *inteiramente* com as leis dinâmicas lineares contidas no processo 2; b) “todo sistema sujeito a uma observação externa pode ser considerado como parte de um sistema isolado maior”²³⁰. Tal “sistema maior”, é chamado por Everett (1983 [1957], p. 317) de “estado absoluto”²³¹, do qual partem os múltiplos “estados relativos”²³². Na formulação de Everett (1983 [1957], pp. 320-321) no processo de medição, o estado *absoluto* se desdobra em estados *relativos paralelos*, de modo que cada possibilidade de superposição *de fato aconteça* em cada estado relativo:

Ao longo de toda sequência do processo de observação, existe apenas um sistema físico representando o observador, ainda que não exista um único estado do observador (que se segue das representações dos sistemas que interagem). Apesar disso, existe uma representação em termos de uma superposição, onde cada elemento contém um estado definido do observador e um estado do sistema correspondente. Assim, em cada observação (ou interação) sucessiva, o estado do observador se “ramifica” em um número de estados diferentes. Cada ramificação representa um

²³⁰ No original: “every system that is subject to external observation can be regarded as part of a larger isolated system”

²³¹ No original: “absolute state”.

²³² No original: “relative state”.

resultado diferente da medição e do estado correspondendo ao estado do objeto. Todas as ramificações existem simultaneamente na superposição após qualquer sequência de observações. A “trajetória” da configuração da memória de um observador realizando uma sequência de medições não é, portanto, uma sequência linear de configurações na memória, mas uma árvore que se ramifica, com todos os resultados possíveis existindo simultaneamente em uma superposição final com vários coeficientes no modelo matemático.²³³

Deve ficar claro que na interpretação de Everett (1983 [1957], p. 320, nota), não há dicotomia entre estados *potenciais* e estados *atuais*, tampouco a transição de potência para ato: “*todos os elementos de uma superposição (todos as ‘ramificações’) são ‘atuais’, nenhum é mais ‘real’ do que os demais*”²³⁴, de modo que todos os elementos de uma superposição obedeçam, igualmente e separadamente, ao processo 2 – o que implicaria, para Everett (1983 [1957], p. 320, nota), numa “total falta de efeito de uma ramificação sobre outra”²³⁵, o que também implica que “nenhum observador jamais estará ciente de qualquer processo de ‘divisão’”²³⁶. A questão da impossibilidade da observação de tal ramificação dos estados é salientada por Jammer (1974, p. 514), quem afirma que “nenhum experimento em dada ramificação poderia revelar o resultado de uma medição obtida em outra ramificação do universo”²³⁷.

DeWitt (1970, p. 31) cunhou o termo “mundos” para a noção de “estados relativos”, quando afirmou que, revisitando o paradoxo do *gato*, a interpretação dos

²³³ No original: “*Throughout all of a sequence of observation processes there is only one physical system representing the observer, yet there is no single unique state of the observer (which follows from the representations of interacting systems). Nevertheless, there is a representation in terms of a superposition, each element of which contains a definite observer state and a corresponding system state. Thus with each succeeding observation (or interaction), the observer state “branches” into a number of different states. Each branch represents a different outcome of the measurement and the corresponding eigenstate for the object-system state. All branches exist simultaneously in the superposition after any given sequence of observations. The “trajectory” of the memory configuration of an observer performing a sequence of measurements is thus not a linear sequence of memory configurations, but a branching tree, with all possible outcomes existing simultaneously in a final superposition with various coefficients in the mathematical model*”.

²³⁴ No original: “*all elements of a superposition (all “branches”) are “actual”, none any more “real” than the rest*”.

²³⁵ No original: “*total lack of effect of one branch on another*”.

²³⁶ No original: “*no observer will ever be aware of any ‘splitting’ process*”.

²³⁷ No original: “*no experiment in a given branch [...] can ever reveal the outcome of a measurement obtained in another branch of the universe*”.

estados relativos “[...] considera que os gatos habitam dois mundos simultâneos, que não interagem, mas que são igualmente reais”²³⁸, o que popularizou a interpretação de Everett (1983 [1957]) como a “interpretação dos muitos mundos” (do inglês “*many-worlds*”). Jammer (1974, p. 512) ressalta que, nessa interpretação dos estados relativos, as superposições nunca *colapsam*; desta forma:

Para conciliar essa suposição com a experiência ordinária, que atribui ao sistema do objeto (ou o sistema de aparelhos correlacionados) após a medição apenas um valor definitivo do observável, a formulação dos estados relativos faz a sugestão ousada de que o “mundo” [...] foi dividido, como consequência da interação, para uma multiplicidade de “mundos” igualmente reais, cada um dos quais correspondendo a um componente definido pela superposição [...]. Assim, em cada “mundo” separado uma medição tem apenas um resultado, apesar de que este resultado difira, em geral, de “mundo” para “mundo”.²³⁹

Ainda assim, Barrett (2014, p. 2) observa que Everett jamais endossou que a noção de “estados relativos” pudesse ser traduzida para o termo “mundos”:

De fato, a maioria das interpretações da mecânica quântica sem colapso tem sido, uma vez ou outra, atribuídas diretamente a Everett ou sugeridas como reconstruções caridosas. A mais popular dessas, a interpretação dos muitos mundos, é frequentemente atribuída a Everett diretamente e sem qualquer tipo de comentário até mesmo quando o próprio Everett jamais descrevera sua teoria em termos de “muitos mundos”.²⁴⁰

Uma análise panorâmica das críticas que a interpretação dos estados relativos recebeu pode ser encontrada em Jammer (1974, p. 516-519). Ressaltamos apenas que

²³⁸ No original: “[...] pictures the cats as inhabiting two simultaneous, noninteracting, but equally real worlds”.

²³⁹ No original: “To reconcile this assumption with the ordinary experience which ascribes to the object system (or the correlated apparatus system) after the measurement only one definite value of the observable, the relative state formulation makes the bold suggestion that the “world” [...] has been split, as consequence of the interaction, into a multitude of equally real “worlds” each of which corresponds to a definite component of the superposition [...]. Hence in each separate “world” a measurement yields only one result, though this result differs, in general, from “world” to “world””.

²⁴⁰ No original: “Indeed, most no-collapse interpretations of quantum mechanics have at one time or another either been directly attributed to Everett or suggested as charitable reconstructions. The most popular of these, the many worlds interpretation, is often simply attributed to Everett directly and without comment even when Everett himself never described his theory in terms of many worlds”.

o aspecto mais criticado de tal interpretação é o comprometimento metafísico com algum tipo de multiverso; d’Espagnat (2006, pp. 191-192) chega a *descartar* tal interpretação mediante tal crítica, na medida em que a interpretação dos estados relativos não é clara quanto ao *momento* em que o universo se divide, isto é, exatamente *quando* uma ramificação ocorreria. Para Belinfante (1973, p. 313), a interpretação dos estados relativos não responde o problema da medição, mas tão-somente *evita* o axioma do “colapso” de um ponto de vista prático, o que coaduna com a leitura feita por Stefano Osnaghi (2008, pp. 160-161, ênfase nossa), para quem:

A visão de Everett tinha uma notação mais pragmática do que ontológica. O que inspirou a tentativa de Everett de interpretar a teoria quântica como uma “descrição objetiva” não foi o desejo de captar a estrutura do mundo putativamente “real” por trás dos fenômenos quânticos, mas a preocupação de evitar aquilo que ele considerava as implicações subjetivistas do postulado da projeção [do colapso].²⁴¹

Ainda que os aspectos ontológicos da interpretação dos estados relativos não tenham sido o objetivo central da discussão suscitada por Everett (1983 [1957]), é notável que suscite outro espectro de problemas metafísicos – por mais que nenhum deles se relacione com o subjetivismo.

Também é relevante ressaltar que tal interpretação recebera diversas releituras, com diversas formulações metafísicas, na qual a dos “muitos mundos” referida acima é apenas uma. Outra formulação derivada seria a interpretação das “muitas mentes” (do inglês “*many-minds*”), onde podemos referir os trabalhos de Albert e Loewer (1988) e Lockwood (1989). Outra interpretação notável, que a princípio se relaciona com a discussão da seção anterior, fora suscitada por Euan

²⁴¹ No original: “*Everett’s view had a pragmatic rather than ontological notation. What inspired Everett’s attempt to interpret the quantum theory as an “objective description” was not the yearning to capture the structure of the “real” world putatively underlying quantum phenomena, but rather the concern to avoid what he regarded as the subjectivistic implications of the projection postulate*”.

Squires²⁴² (1991, 1993) na medida em que postula uma “consciência universal”, que se remete ao “estado absoluto” de Everett (1983 [1937]).

Ainda assim, Saunders (2010, p. 9, nota 5) afirma que Everett jamais mencionou o termo “consciência”, ainda que tenha se referido ao termo “experiência”, e que Zeh (2000) tenha insistido continuamente na necessidade de um postulado especial para a consciência na interpretação dos estados relativos.

3.4.4 A interpretação dos estados latentes

Para Margenau (1958), as leis dinâmicas da teoria quântica (processo 2) são suficientes e o postulado do *colapso* (processo 1) acabaria por introduzir uma *assimetria* desnecessária na teoria, motivo pelo qual é *rejeitado*. Tal atitude frente à medição o aproximara da *interpretação estatística* (cf. Jammer, 1974, p. 208). As interpretações subjetivistas da *consciência causando o colapso* também são rejeitadas por Margenau (1963, p. 482) sob a acusação de tornar a mecânica quântica uma teoria psicológica (cf. Jammer, 1974, p. 487).

²⁴² Em um raciocínio similar ao de Wigner (1983 [1961]), Squires (1991, pp. 285) propõe o postulado da “universalidade da consciência”; no original: “*universality of consciousness*”, isto é, a existência de uma “consciência universal” (cf. Squires, 1993, p. 117). O raciocínio de Squires (1993, pp. 117-118) se dá da seguinte forma: “*Se supusermos que a minha e a sua consciência pode selecionar independentemente suas experiências, então não existiria algo para prevenir que fizéssemos escolhas diferentes. [...] Isso não significa que iríamos discordar do resultado das nossas experiências quando nos encontrarmos (é um fato simples da teoria quântica que isso não pode ocorrer); ao invés disso, significa que ‘você’ que eu encontraria não seria escolhido pela sua consciência, isto é, você não seria mais um ser consciente! Tal possibilidade bizarra deve, certamente, ser excluída. Isso requer que haja somente uma seleção. A maneira mais simples de assegurar que isso ocorra é postular que há somente uma mente consciente [...], isso é, que há uma consciência universal*”; no original: “*If we were to suppose that my consciousness and yours can select what they experience independently, then there would be nothing to prevent our selecting different answers. [...] This would not mean that when we met we would disagree on the result (it is a simple fact of quantum theory that this could not happen); rather, it would mean that the ‘you’ whom I met would not be the one chosen by your consciousness, i.e., you would no longer be a conscious being! Such a bizarre possibility must, surely, be excluded. What this requires is that there can be only one selection. The simplest way of ensuring this is to postulate that there is only one conscious mind [...], i.e., that there is a universal consciousness*”. A proposta de Squires (1991, 1993), no entanto, se relaciona com teorias da medição que não aceitam a existência do colapso, e por isso se diferencia das demais propostas discutidas na seção anterior.

Proponente do que Jammer (1974, p. 505) chama de “teoria de latência” (do inglês “*latency theory*”), Margenau (1954) considera que uma medição *revela* um estado *latente* de um objeto. Jammer (1974, p. 505) chama a atenção para o fato de que Margenau, mesmo utilizando de um referencial epistemológico e metodológico diverso daquele oferecido pela interpretação ortodoxa, chega a conclusões a respeito da interpretação da mecânica quântica muito próximas das conclusões apresentadas pela interpretação da complementaridade.

Um dos aspectos notáveis seria tal interpretação sobre os estados latentes, que se tornariam manifestos com o ato da medição, que é muito próxima da posição de Heisenberg (1958) de que os estados observáveis são *potencialidades* (à maneira aristotélica) passíveis de serem *atualizadas* com o ato da medição. Ainda assim, os dois autores diferem em um aspecto ontológico, na medida em que Margenau considera a medição um ato de *revelação* (cf. Jammer, 1974, p. 387), enquanto Heisenberg (1983 [1927], p. 73) considera um ato de *criação*.

Outro aspecto notável seria que Margenau considera a medição um fenômeno *macroscópico* (cf. Jammer, 1974, p. 487), o que se aproxima da posição ortodoxa frente à interpretação da medição quântica. Ao mesmo tempo, tal posição de Margenau acaba por engendrar na mesma problemática que, do ponto de vista filosófico, representa uma dificuldade para a interpretação de Bohr: o referido *aspecto duplo* da ontologia com a qual a interpretação se compromete, isto é, a cisão arbitrária entre os domínios clássico/quântico, acompanhada por uma metafísica própria de cada domínio – especificamente com o comprometimento ontológico com entidades diferentes. Assim, por mais que evite os problemas ontológicos da consciência, a proposta de Margenau acabaria por *herdar* uma problemática tão séria quanto.

3.4.5 A interpretação do colapso espontâneo

Por sua vez, a formulação de GRW (1985, 1986), considerada por alguns como uma das *melhores teorias da medição quântica* (cf. Maudlin, 2003), é uma teoria que

admite o *colapso* descontínuo. No entanto, como aponta Maudlin (2003, p. 475), abandona a noção de que um agente causal é necessário para que uma medição seja efetuada: “nessa teoria, colapsos acontecem aleatoriamente, com uma probabilidade fixa, e não são particularmente associados com qualquer tipo de interação”²⁴³. Em tal formulação, o *colapso* acontece *espontaneamente*. De acordo com Pessoa Júnior (1992, p. 200), as formulações que assumem a noção de *colapso espontâneo* funcionariam apenas para sistemas macroscópicos:

Para sistemas de poucas partículas tal localização [o referido colapso] ocorreria muito raramente, e praticamente não violaria a equação de Schrödinger. Para um sistema macroscópico, no entanto, composto de um grande número de partículas emaranhadas, tal colapso espontâneo ocorreria freqüentemente. Isso explicaria porque a redução só ocorre quando um aparelho macroscópico se acopla ao objeto quântico.

Assim, da mesma forma como a interpretação ortodoxa e a interpretação de Margenau (1954), tal formulação incorreria no problema filosófico do *macro-realismo* (cf. Albert, p. 105).

3.5 Considerações finais

Analisamos, neste terceiro capítulo, o problema da medição. Introduzido propriamente por von Neumann (1955 [1932]), este problema se origina em conflito axiomático entre as equações dinâmicas e o fato empírico da *observação*. A posição de von Neumann, foi endossada durante os anos seguintes, atingindo seu ápice na formulação subjetivista de London e Bauer (1983 [1939]) e em sua maior dificuldade com a situação *solipsista* proposta através do experimento de pensamento do amigo de Wigner (1983 [1961]). Bass (1971) tentou superar tal dificuldade utilizando a concepção de *consciência* oferecida por Schrödinger (1967 [1944], 1964) que, por sua vez, seria baseada nos escritos indianos do Vedanta. Goswami (1989) levou a cabo a

²⁴³ No original: “in that theory, collapses happen at random, with a fixed probability, and are not particularly associated with any kind of interaction”.

formulação de uma *interpretação* para a mecânica quântica com base no pensamento vedântico, bem como a formulação de um paradigma para as ciências baseado numa ontologia na qual a consciência (à maneira vedântica) é a base do ser.

Conforme procuramos expor, os debates filosóficos suscitados pelas dificuldades conceituais acerca da interpretação da noção de *medição* deram origem a diversas interpretações da teoria quântica (cf. Jammer, 1974, p. 521) em que, como observa Pessoa Junior (2003, p.4) “[...] cada uma dessas interpretações é internamente consistente e, de modo geral, consistente com experimentos quânticos”. Todavia, pudemos observar que, dentre as interpretações que abordam o problema, *nenhuma é livre de dificuldades filosóficas*.

Parece seguro classificar tais dificuldades em dois grupos maiores: 1) o *macro-realismo*, próprio das interpretações que separam o domínio *clássico* do domínio *quântico* em dois domínios ontológicos diferentes, onde o *primeiro* é agente causal sobre o *segundo*; 2) a introdução de agentes *metateóricos* para a causação da medição; nos casos estudados, a introdução e comprometimento ontológico com *consciência* por duas vias: 2a) *subjetiva/múltipla*, numa concepção *dualista*, que herda os problemas da teoria *cartesiana*; 2b) *unitiva*, à maneira do pensamento *vedantino*, que também se compromete com a problemática própria de tal linha.

Poderíamos colocar num terceiro grupo as teorias que não admitem a descontinuidade da medição, isto é, o postulado do colapso, como as teorias de Bohm e Everett, que também suscitam problemas metafísicos na tentativa de solucionar o problema da medição. Poderíamos ainda colocar as interpretações estatísticas num outro grupo, onde a questão da medição não é abordada.

CONCLUSÃO

A mecânica quântica funciona. *Para todos os propósitos práticos*²⁴⁴, a teoria não precisa de outra interpretação que não a ortodoxa (ou até mesmo a interpretação estatística), que funciona suficientemente bem para a predição de experimentos. No entanto, se nos arriscarmos a ir além dos propósitos práticos e investigarmos os fundamentos filosóficos da teoria, poderemos observar que até mesmo as interpretações mais bem aceitas pela comunidade científica são fundadas em problemas filosóficos aparentemente insolúveis no que tange ao conceito de “medição”.

O campo da *interpretação* da teoria quântica, especificamente em relação à interpretação do conceito de “medição”, é fortemente marcado por hipóteses “*ad hoc*” no sentido proposto por Popper (1974, p. 986), isto é, “uma hipótese [é] ‘ad hoc’ se é introduzida [...] para explicar uma dificuldade particular, mas [...] não pode ser testada independentemente”²⁴⁵.

A *interpretação de Copenhague* e a *interpretação de Princeton* enfrentam, respectivamente, problemas ontológicos relacionados ao *macrorrealismo* e à noção de “*consciência*”. No caso da interpretação de Copenhague, tal problemática está relacionada à *falta de debate* da própria noção de medição que, ainda que seja central nessa interpretação, não recebeu um tratamento detalhado, isto é, a interpretação de Copenhague não chega a oferecer uma teoria da medição.

Por outro lado, a interpretação de Princeton surge precisamente da formulação de uma teoria da medição que aponta algumas dificuldades na adoção de uma ontologia macrorrealista. No entanto, a introdução da consciência como uma agência metateórica para a causação da *medição* acaba por *introduzir novos problemas de ordem filosófica* na medida em que tal introdução *não é acompanhada de uma*

²⁴⁴ Termo cunhado pelo físico John Bell (1990, p. 33), do inglês “*for all practical purposes*”, também bastante referida em sua forma abreviada “FAPP”.

²⁴⁵ No original: “*a conjecture [is] ‘ad hoc’ if it is introduced [...] to explain a particular difficulty, but if [...] it cannot be tested independently*”.

formulação ontológica que defina ou ao menos discuta o lugar de tal entidade no universo em questão.

Referimos os trabalhos tardios de Schrödinger como uma tentativa de visualizar tais questões através de um projeto filosófico que inspirou físicos como Bass e Goswami, que deram continuidade à interpretação da “consciência” e que se empenham a responder as dificuldades apontadas pela escola de Copenhague e Princeton. No caso, Bass faz uso do referencial metafísico schrödingeriano para compreender o conceito de “consciência”, enquanto Goswami interpreta tal noção sob o referencial do monismo idealista platônico. Em ambos autores, a noção de “consciência” é unitiva, embora Goswami, assim como Schrödinger, seja mais explícito no aspecto ontológico quando considera a “consciência” unitiva como a base ontológica de sua metafísica.

Por outro lado, existem outras interpretações que não admitem o problema, conforme enunciado pelas escolas de Copenhague e Princeton. Dentre elas, as atitudes mais expressivas se encontram nas interpretações dos estados relativos de Everett e a interpretação causal/ontológica de Bohm. Ambas se utilizam de outros contornos metafísicos para evitar o chamado “problema da medição”: a primeira postula “ramificações” infinitas do universo, de modo que todas são simultaneamente reais; a segunda postula infinitas “ordens” ou “níveis” metafísicos de nível cada vez mais alto, de modo que cada ordem de nível superior é agente causal e determina sua ordem subalterna.

Também destacamos a atitude comum às *interpretações estatísticas*, nas quais a problemática filosófica em torno da medição é *deliberadamente deixada de lado* pela introdução de coletivos estatísticos imaginários. De fato, tal atitude acaba por ser em muitos aspectos uma extensão da ontologia da física clássica, mantendo, por exemplo, a noção de determinismo e realismo. Por isso, se coaduna com nossas percepções intuitivas acerca do mundo à nossa volta e, por isso, acaba por ser preferível por muitos teóricos. Também é uma atitude preferível a muitos cientistas justamente por não se envolver com problemas filosóficos. Ainda assim, deve ficar

claro que tal interpretação *não resolve as questões concernentes à interpretação do conceito de “medição” em mecânica quântica*, mas deliberadamente se *afasta* de toda a problemática que surge na tentativa de interpretá-lo. Ademais, não deixa de ser uma atitude metafísica na medida em que os *ensembles* são coletivos estatísticos inteiramente *imaginários*.

Ao final, deve ficar claro que o debate sobre “qual seria a *melhor interpretação da mecânica quântica?*” é um debate *em aberto* – ou, como Jammer (1974, p. 521) coloca, é essencialmente “uma história sem um fim”²⁴⁶ –, de modo que nosso propósito não foi o de resolver tal questão, mas de *delinear* alguns aspectos da problemática filosófica em torno das questões metafísicas e ontológicas associadas ao conceito de “medição” em mecânica quântica.

Ainda assim, é relevante destacar que *grande parte dos problemas das interpretações destacadas neste estudo se deve à falta de debate filosófico*, especificamente à deficiência de formulações ontológicas para o universo de discurso que se abriu com o advento da teoria quântica. Deste modo, os debates futuros na área da ontologia, levando em consideração alguns aspectos da mecânica quântica, poderiam acabar por auxiliar na elucidação de questões problemáticas centrais na teoria quântica, tal como as noções de “medição” ou “consciência”.

²⁴⁶ No original: “*a story without an ending*”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, David Z. *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge: Harvard University Press, 1992.

ALBERT, David Z.; LOEWER, B. "Interpreting The Many Worlds Interpretation". *Synthese*, vol. 77, pp. 195-213, 1988.

ARENHART, Jonas R. B.; KRAUSE, Décio. "Indistinguibilidade, Não Reflexividade, Ontologia E Física Quântica". *Scientiae studia*, São Paulo, vol. 10, n. 1, 2012.

ARENHART, Jonas R. B.; KRAUSE, Décio. "Potentiality and Contradiction in Quantum Mechanics". Em: KOSLOW, Arnold; BUCHSBAUM, Arthur (eds.). *The Road to Universal Logic: Festschrift for the 50th Birthday of Jean-Yves Béziau*. Volume II, pp. 201-211. Basel: Birkhäuser, 2015.

ARISTÓTELES. *Metafísica*.

ARISTÓTELES. *Órganon*.

ASPECT Alain; DALIBARD, Jean; ROGER, Gérard. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers". *Physical Review Letters*, n. 49, vol. 25, pp. 1804-1807, 1982.

BALLENTINE, Leslie E. "The Statistical Interpretation Of Quantum Mechanics". *Reviews of Modern Physics*, vol. 42, n. 4, pp. 358-381, 1970.

BARRETT, Jeffrey. "Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.

BARRETT, Jeffrey. *The Quantum Mechanics Of Minds And Worlds*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

BASS, Ludvik. "The Mind of Wigner's Friend". *Hermathena*. Dublin: Dublin University Review, vol. 113, pp. 52-68, 1971.

BECHER, Erich. *Die philosophischen Voraussetzungen der exakten Naturwissenschaften*. Leipzig: Barth, 1906.

BECHER, Erich. *Geisteswissenschaften und Naturwissenschaften*. Munique: Duncker und Humblot, 1921.

BECKER, Lon. "That von Neumann Did Not Believe in a Physical Collapse". *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 55, n. 1, pp. 121-135, 2004.

BELINFANTE, Frederik J. *A Survey of Hidden-Variable Theories*. Oxford: Pergamon Press, 1973.

BELL, John S. "On The Einstein-Podolsky-Rosen Paradox". *Physics*, vol. 1, pp. 195-200, 1964.

BELL, John S. "On The Problem Of Hidden Variables In Quantum Mechanics". *Reviews of Modern Physics*, 38, pp. 447-452, 1966.

BELL, John S. "Speakable And Unspeakable In Quantum Mechanics" (1984). Em: BELL, John S. *Speakable And Unspeakable In Quantum Mechanics: Collected Papers On Quantum Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

BELL, John S. "Against 'Measurement'". *Physics World*, vol. 8, pp. 33-40, 1990.

BELLER, Mara. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1999.

BELLER, Mara; FINE, Arthur. "Bohr's Response To EPR". Em: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (eds.). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, pp. 1-31. Boston Studies. In *The Philosophy Of Science* vol. 153, Kluwer Academic Publishers, 1994.

BERTOTTI, Bruno. "The later work of E. Schrödinger". *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. 16 (2), pp. 83-100, 1983.

BIRKHOFF, Garrett; VON NEUMANN. John. "The Logic of Quantum Mechanics". *Annals of Mathematics* Second Series. Vol. 37, No. 4, pp. 823-843, 1936.

BITBOL, Michel. "The problems of other minds: a debate between Schrödinger and Carnap". *Phenomenology and the Cognitive Science*, 3 (1), pp. 115-123, 2004.

BOHM, David. "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables, I and II". *Physical Review*, vol. 85, pp. 166-193, 1952.

BOHM, David. *Quantum Theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1951.

BOHM, David. *Wholeness and Implicate Order*. London, Routledge and Kegan Paul, 1980.

BOHM, David; HILEY, Basil J. *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. New York, Routledge, 1993.

BOHR, Niels. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" (1935). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 145-151, 1983.

BOHR, Niels. "Natural Philosophy and Human Cultures". *Nature*, 143, pp. 268-272, 1938.

BOHR, Niels. "Quantum Physics and Philosophy: Causality and Complementarity". Em: KLIBANSKY, R. (ed.). *Philosophy in Mid-Century: A Survey*. Florence: La Nuova Italia Editrice, 1958b.

BOHR, Niels. "The Genesis of Quantum Mechanics", (1961). Em: BOHR, Niels. *The Philosophical Writings of Niels Bohr, Volume II: Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, pp. 74-78. Woodbridge: Ox Bow Press, 1963.

BOHR, Niels. "The Quantum Postulate And The Recent Development Of Atomic Theory", (1928). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*, pp. 87-126. Princeton: Princeton University Press, 1983.

BOHR, Niels. *Atomic Physics and Human Knowledge*. New York: Wiley, 1958a.

BOHR, Niels. *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934.

BOHR, Niels. *The Philosophical Writings of Niels Bohr, Volume II: Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. Woodbridge: Ox Bow Press, 1963.

BREUER, Thomas. "von Neumann, Gödel And Quantum Incompleteness". Em: RÉDEI, Miklós; STÖLTZNER, Michael. (eds.). *John von Neumann and the foundations of Quantum Physics*, pp. 75-82. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.

BUNGE, Mario A. (ed.). *Quantum Theory and Reality*. New York: Springer, 1967.

BUNGE, Mario A. *Treatise On Basic Philosophy, vol. 3, Ontology I: The Furniture Of The World*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1977.

CAMILLERI, Kristian. "Bohr, Heisenberg And The Divergent Views Of Complementarity". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, p. 514-528, 2007.

CAMPBELL, Norman R. *An Account of the Principles of Measurement and Calculation*. London: Longmans and Green, 1928.

CARNAP, Rudolf. *Meaning And Necessity: A Study In Semantics And Modal Logic*. Chicago: University of Chicago Press, 1956.

CASSIDY, David C. *Uncertainty: the Life and Science of Werner Heisenberg*. New York, Freeman, 1992.

CASSIDY, David, C. "Answer To The Question: When Did The Indeterminacy Principle Become The Uncertainty Principle?" *American Journal of Physics*, 66, pp. 278-279, 1998.

CATTANEO, Gianpiero; DALLA CHIARA, Maria L; GIUNTINI, Roberto; PAOLI, Francesco. "Quantum Logic And Nonclassical Logics". Em: ENGESESSER, Kurt; GABBAY, Dov M; LEHMANN, Daniel (eds.). *Handbook Of Quantum Logic And Quantum Structures*. Amsterdam, Elsevier, 2009.

CHIBENI, Silvio S. "Certezas E Incertezas Sobre As Relações De Heisenberg". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 27, n. 2, pp. 181-192, 2005.

CHIBENI, Silvio. S. *Aspectos Da Descrição Física Da Realidade*. Campinas, Unicamp, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Coleção CLE, 1997.

CHURCH, Alonzo. *Introduction To Mathematical Logic*. Princeton, Princeton University Press, 1996.

COHEN, Robert S. "Some Notes on Schrödinger and Mysticism". Em: BITBOL, Michel; DARRIGOL, Olivier (eds.). *Schrödinger: Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*, pp. 95-100. Gif-sur-Yvette, Editions Frontieres, 1992.

CONGER, George P. "Eastern and Western Metaphysics". Em: MOORE, Charles A. *Philosophy – East and West*, pp. 236-247. Princeton: Princeton University Press, 1944.

CREATH, Richard. "Logical Empiricism". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.

CUSHING, James T. "The Causal Quantum Theory Program". Em: CUSHING, James T; FINE, Arthur; GOLDSTEIN, Sheldon (eds.). *Bohmian Mechanics And Quantum Theory : An Appraisal*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

CUSHING, James T. *Quantum Mechanics: Historical Contingency And The Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

CUSHING, James T.; MCMULLIN, Ernan, (eds.). *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame:University of Notre Dame Press, pp. 224-253, 1989.

D'ESPAGNAT, Bernard. *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. Massachusetts: Perseus Books, 1999.

D'ESPAGNAT, Bernard. *In Search Of Reality (1979)*. New York, Springer, 1983.

D'ESPAGNAT, Bernard. *On Physics And Philosophy*. Princeton: Princeton University Press, 2006.

D'OTTAVIANO, Ítala. M. L.; FEITOSA, Hércules. A. F. *Sobre A História Da Logica, A Lógica Clássica E O Surgimento Das Lógicas Não-Clássicas*. Unesp, 2003.

DA COSTA, Newton C. A. *Ensaio sobre os fundamentos da lógica*. São Paulo: Edusp/Hucitec, 1980.

DA COSTA, Newton C. A. *Lógica indutiva e Probabilidade*. São Paulo: Edusp/Hucitec, 1993).

DA COSTA, Newton C. A.; KRAUSE, Décio. "The Logic Of Complementarity". Em: VAN BENTHEM, Johan; HEINZMANN Gerhard; REBUSCHI , Manuel.; VISSER, Henk. (eds.). *The Age of Alternative Logics: Assessing Philosophy of Logic and Mathematics Today*. Springer: pp. 103-120. 2006.

DA COSTA, Newton C. A.; KRAUSE, Décio; BUENO, Otávio. "Paraconsistent Logics and Paraconsistency." Em: Jacqueline, Dale. (ed.). *Philosophy of Logic* (Handbook of the Philosophy of Science). Amsterdam: Elsevier, pp. 791–912, 2007.

DA COSTA, Newton. C. A. "Logic and ontology". *Principia*, 6, 2, p. 279-98, 2002.

DAVIDSON, Donald. "The Logical Form of Action Sentences" (1967). Em: DAVIDSON, Donald. *Essays on Actions and Events*. Oxford: Oxford University Press, pp. 105-122, 1980.

DEWITT, Bryce S. "Quantum Mechanics and Reality". *Physics Today*, vol. 23, pp. 30–35, 1970.

DICKE, Robert H.; WITTKE, James P. *Introduction to Quantum Mechanics*. Addison Wesley Publishing Company, 1960.

EASTMAN, Timothy E.; KEETON, Hank. *Physics and Whitehead: Quantum, Process, and Experience*. Albany: State University of New York Press, 2003.

EINSTEIN, Albert. "Autobiographical Notes", (1949a). Em: SCHILPP, Paul A. (ed.). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Tudor, New York: pp. 3-105. 1949.

EINSTEIN, Albert. "Quantum mechanics and reality", (1948). Em: BORN, Max. (ed.). *The Bohr-Einstein Letters*. London: MacMillan, pp. 168-173, 1971.

EINSTEIN, Albert. "Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume", (1949b). Em: SCHILPP, Paul A. (ed.). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Tudor, New York: Library of Living Philosophers, pp. 665-688. 1949.

EINSTEIN, Albert. *Out of My Later Years*. New York: Philosophical Library, 1950.

EINSTEIN, Albert; PODOLSKY, Boris; ROSEN, Nathan. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" (1935). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 138-141, 1983.

EPPERSON, Michael. *Quantum Mechanics And The Philosophy Of Alfred North Whitehead*. New York: Fordham University Press, 2004.

EVERETT, Hugh III. "'Relative State' Formulation Of Quantum Mechanics" (1957). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 315-323. 1983.

FARIAS, Ruy H. A. *Uma introdução aos fundamentos da mecânica quântica*. 1987. 187 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.

FAVRHOLDT, David. "Niels Bohr and Realism". Em: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (eds.). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston: Boston Studies In The Philosophy Of Science vol. 153, pp. 77-96. Kluwer Academic Publishers, 1994.

FAYE, Jan. "Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2008.

FAYE, Jan. *Niels Bohr: His Heritage And Legacy, An Anti-Realist View Of Quantum Mechanics*. Kluwer Academic Publishers, 1991.

FEYNMAN, Richard P; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. *The Feynman Lectures On Physics*. Califórnia: New Millenium Edition, Basic Books, California Institute of Technology, volume III, 2010.

FINE, Arthur. "Einstein And Ensembles: Response". *Foundations of Physics*, 20 (8), pp. 967-989, 1990.

FINE, Arthur. *The Shaky Game: Einstein, Realism And The Quantum Theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

FOLSE, Henry J. "Bohr's Framework of Complementarity and the Realism Debate". Em: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (eds.). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston: Boston Studies In The Philosophy Of Science vol. 153, Kluwer Academic Publishers, pp. 119-139, 1994.

FOLSE, Henry. *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*. Amsterdam: North Holland, 1985.

FREIRE JUNIOR, Olival. "Science And Exile: David Bohm, The Cold War, And A New Interpretation Of Quantum Mechanics". *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 36, n. 1, pp. 1-34, 2005.

FREIRE JUNIOR, Olival. *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. New York: Springer, 2015.

FREIRE JUNIOR, Olival; PATY, Michel; BARROS, Alberto L. R. "Sobre A Recepção Do Programa Causal De David Bohm". Em: PESSOA JUNIOR, Osvaldo (org.). *Fundamentos da Física 1*. São Paulo: Editora Livraria da Física, pp. 123-134, 2000.

GHIRARDI, Giancarlo C.; RIMINI, Alberto; WEBER, Tullio. "A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems". Em: ACCARDI, L.; VON WALDENFELS, W (eds.). *Quantum Probability and Applications*. Berlin: Springer, 1985.

GHIRARDI, Giancarlo C.; RIMINI, Alberto; WEBER, Tullio. "Unified Dynamics For Microscopic And Macroscopic Systems". *Physical Review, D* 34: p. 470, 1986.

GIBBINS, Peter. *Particles And Paradoxes: The Limits Of Quantum Logic*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

GOBRY, Ivan. *Vocabulário Grego da Filosofia*. São Paulo: Martins Fontes, 2007.

GÖDEL, Kurt. "On Formally Undecidable Propositions Of Principia Mathematica and Related Systems 1" (1931). Em: HEIJENOORT, Jean van (ed.). *From Frege To Gödel: A Source Book In Mathematical Logic, 1879-1931*. Cambridge: Harvard University Press, pp. 592-616, 1967.

GOMES, Evandro L. *Sobre a história da paraconsistência e a obra de da Costa: a instauração da Lógica Paraconsistente*. 2013. 666 p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas e Centro de Lógica Epistemologia e História da Ciência, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

GOSWAMI, Amit. "Physics Within Nondual Consciousness". *Philosophy East and West*, vol. 51, n. 4, pp. 535-544, 2001b.

GOSWAMI, Amit. "The Idealistic Interpretation Of Quantum Mechanics". *Physics Essays*, 2, pp. 385-400, 1989.

GOSWAMI, Amit. *Quantum Mechanics (1992)*. Long Grove: Waveland Press, 2003.

GOSWAMI, Amit. *The Physicists' View Of Nature – Part 2: The Quantum Revolution*. New York: Springer, 2001.

GOSWAMI, Amit. *The Self-Aware Universe: How Consciousness Creates The Material World*. New York: Penguin Putnam, 1993.

GOUGH, Archibald E. *The Philosophy Of The Upanishads And Ancient Indian Metaphysics*. London: Kegan Paul, 1891.

GRINBERG-ZYLBERBAUM, Jacobo; DELAFLOR, M.; ATTIE, L.; GOSWAMI, Amit. "The Einstein-Podolsky-Rosen Paradox in the Brain: The Transferred Potential". *Physics Essays*, pp. 422-428, vol. 7, n. 4, 1994.

HEISENBERG, Werner. "A Descoberta De Planck E Os Problemas Filosóficos Da Física Atômica", (1958). Em: BORN, Max; AUGER, Pierre; SCHRÖDINGER, Erwin R. J; HEISENBERG, Werner (eds.). *Problemas da Física Moderna* (1961). São Paulo: Perspectiva, 2004.

HEISENBERG, Werner. "Is a deterministic completion of quantum mechanics possible?" Em: HERMANN, Armin H.; VON MEYENN, Karl; WEISSKOPF, Victor. F. (eds.). *Wolfgang Pauli: Scientific Correspondence With Bohr, Einstein, Heisenberg*. New York: Springer, vol. 1: 1919–1929, pp. 409-418, 1979.

HEISENBERG, Werner. "On The Physical Content Of Quantum Theoretical Kinematics And Mechanics", (1927). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 62-84, 1983.

HEISENBERG, Werner. "Quantum theory and its interpretation". Em: ROZENTAL. S. (ed.), *Niels Bohr: His Life And Work As Seen By His Friends And Colleagues*. Amsterdam: North-Holland, pp. 94-108, 1967.

HEISENBERG, Werner. "The Development of the Interpretation of the Quantum Theory". Em: PAULI, Wolfgang (ed.). *Niels Bohr and the Development of Physics*. London: Pergamon, pp. 12-29, 1955.

HEISENBERG, Werner. *A Parte E O Todo* (1969). Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

HEISENBERG, Werner. *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. New York: Harper and Row, 1958.

HEISENBERG, Werner. *The Physical Principles of Quantum Theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1930.

HILGEOORD, Jan; UFFINK, Jos, "The Uncertainty Principle". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.

HOFSTADTER, Douglas R. *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*. New York: Basic Books, 1979

HOFWEBER, Thomas. "Logic and Ontology" Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.

HOME, Dipankar; WHITAKER, Andrew M. B. "Ensemble Interpretations Of Quantum Mechanics: A Modern Perspective". *Physics Reports*. Amsterdam: North-Holland, 210, 4, pp. 223-317, 1992.

HOWARD, Don. "Einstein on Locality and Separability". *Studies in History and Philosophy of Science*, 16, pp. 171-201, 1985.

HOWARD, Don. "Einstein's Philosophy of Science". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2015.

HOWARD, Don. "Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments". Em: CUSHING, James T.; MCMULLIN, Ernan, (eds.) *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame: University of Notre Dame Press, pp. 224-253 ,1989.

HOWARD, Don. "What Makes A Classical Concept Classical? Toward A Reconstruction Of Niels Bohr's Philosophy Of Physics". Em: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (eds.). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston: Boston Studies In The Philosophy Of Science vol. 153, Kluwer Academic Publishers, pp. 201-229, 1994.

HOWARD, Don. "Who invented the 'Copenhagen interpretation'? A study in mythology". *Philosophy of Science*, 71, pp. 669–682, 2004.

HUXLEY, Aldous. *The Perennial Philosophy*. Toronto: Oxford University Press, 1947.

JAMMER, Max. *The Philosophy Of Quantum Mechanics: The Interpretations Of Quantum Mechanics In Historical Perspective*. New York: Wiley and Sons, 1974.

JAUCH, Josef M. *Foundations of Quantum Mechanics*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1968.

KAUARK-LEITE, Patrícia M. "Causalidade e Teoria Quântica". *Scientiae Studia*, vol. 10, n. 1, pp. 165-77. São Paulo, 2012.

KÖHLER, Eckehart. "Why von Neumann Rejected Carnap's Dualism of Information Concepts". Em: RÉDEI, Miklós; STÖLTZNER, Michael. (eds.). *John von Neumann and the foundations of Quantum Physics*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 97-134, 2001.

KRAUSE, Décio. "¿Pueden Ser Separables Las Entidades Indiscernibles? Ensayo Sobre Posibles Consecuencias De Una Posición De Einstein Frente A La Indiscernibilidad". Em: GUERRERO PINO, Germán (ed.). *Einstein: científico y filósofo*. Cali: Editorial Universidad del Valle, pp. 125-145, 2010.

KRAUSE, Décio. *Filosofia Da Não-Individualidade: Estudo De Aspectos Lógicos E Ontológicos Da Física Quântica*. Projeto de Pesquisa visando renovação da Bolsa de Produtividade em Pesquisa junto ao programa de filosofia, a partir de Março de 2007. Departamento de Filosofia. Universidade estadual de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

KRIPS, Henry. "Measurement in Quantum Theory". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2013.

KUHN, Thomas S. (entrevistador). "Interview with Dr. Werner Heisenberg at the Max Planck Institute, Munich, Germany, February 25, 1963". *Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics*. USA: College Park, MD, 1963.

KUHN, Thomas. *S. A Estrutura Das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1998.

LIPPS, Theodor. *Psychologische Untersuchungen*. Leipzig: Engelmann, 1907.

LOCKWOOD, Michael. *Mind, Brain and the Quantum: the Compound "I"*. Oxford: Blackwell, 1989.

LONDON, Fritz. *Superfluids, Macroscopic Theory of Superconductivity*. New York: Dover Publications, 1961.

LONDON, Fritz; BAUER, Edmond. "The Theory Of Observation In Quantum Mechanics" (1939). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 217-259, 1983.

MARGENAU, Henry. "Advantages And Disadvantages Of Various Interpretations Of The Quantum Theory". *Physics Today*, 7 (10), pp. 6-13, 1954.

MARGENAU, Henry. "Measurements in Quantum Mechanics". *Annals of Physics*, 23, pp. 469-485, 1963.

MARGENAU, Henry. "Philosophical Problems Concerning The Meaning Of Measurement In Physics" *Philosophy of Science*, 25, pp.23-33, 1958.

MARTINS, Paulo. N. T. P. *A Mecânica Quântica E O Pensamento De Amit Goswami*. 2009. 340 p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

MAUDLIN, Tim. "Distilling Metaphysics from Quantum Physics". Em: LOUX, Michael J.; ZIMMERMAN, Dean W. (eds.). *The Oxford Handbook of Metaphysics*. Oxford: Oxford University Press, 2003.

MURDOCH, Dugald. "The Bohr-Einstein Dispute". Em: FAYE, Jan; FOLSE, Henry J. (eds.). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston: Boston Studies In The Philosophy Of Science vol. 153, Kluwer Academic Publishers, pp. 303-324, 1994.

MURDOCH, Dugald. *Niels Bohr's Philosophy Of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

MURDOCH, Dugald. *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

MURR, Caroline E. *A Realidade Através Do Espelho: Schrödinger E Russell No País Da Objetivação*. 2014. 323 p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MURR, Caroline E. *Física Quântica E Objetividade Científica: Algumas Ideias Filosóficas De Erwin Schrödinger*. 2010. 162 p. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PANGLE, Thomas L. "On Heisenberg's Key Statements Concerning Ontology". *The Review of Metaphysics*, vol. 67, n. 4, pp. 835-859, 2014.

PAPINEAU, David. "Naturalism". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2009.

PARK, J. L. "The Self-contradictory Foundations of Formalistic Quantum Measurement Theories". *International Journal of Theoretical Physics*, 8, pp. 211-218, 1973.

PARSONS, Terence. "The Traditional Square of Opposition". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.

PATY, Michel. "A Noção De Determinismo Na Física E Seus Limites". *Scientiae Studia*. São Paulo, vol. 2, n. 4. Pp. 365-492. 2004.

PENROSE, Roger. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, And The Laws Of Physics*. Oxford: Oxford University Press, 1989.

PEREIRA, Maria H. M. da R. *Platão, A República*. Introdução, trad. do grego e notas, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1990.

PESSOA JUNIOR, Osvaldo F. "Introdução Histórica À Teoria Quântica, Aos Seus Problemas De Fundamento E As Suas Interpretações". *Caderno De Física Da UEFS 04 (01 E 02)*: pp. 89-114, 2006.

PESSOA JUNIOR, Osvaldo F. "O Problema Da Medição Em Mecânica Quântica: Um Exame Atualizado". *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, vol. 3 pp. 177-217, 1992.

PESSOA JUNIOR, Osvaldo F. *Conceitos De Física Quântica, Volume I*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

PFÄNDER, Alexander. *Einführung in die Psychologie*. Leipzig: Barth, 1904.

PLATÃO. *A República*.

POPPER, Karl R. "Quantum Mechanics Without 'The Observer'". Em: BUNGE, Mario A. (ed.). *Quantum Theory and Reality*. New York: Springer, pp. 1-12, 1967.

POPPER, Karl R. "Replies to my critics". Em: SCHILPP, Paul A. (ed.). *The Philosophy of Karl Popper*. La Salle: Library of Living Philosophers, pp. 961-1197, 1974.

POPPER, Karl R. *Quantum Theory and the Schism in Physics*. New Jersey: Rowman And Littlefield, 1982.

POSER, Hans. "The Notion Of Consciousness In Schrödinger's Philosophy Of Nature". Em: GÖTSCHL, Johann (ed.). *Erwin Schrödinger's World View: The Dynamics Of Knowledge And Reality*. Kluwer Academic Publishers, pp. 153-168, 1992.

PRESTON, John. *Kuhn's The Structure of Scientific Revolutions: a Reader's Guide*. London: Continuum, 2008.

PRIMAS, Hans; ESFELD, Michael. *A Critical Review of Wigner's Work on the Conceptual Foundations of Quantum Theory*. Preprint, 1997.

PUTNAM, Hilary. "A Philosopher Looks at Quantum Mechanics (Again)". *British Society for the Philosophy of Science*, vol. 56, pp. 615-634. Oxford: Oxford University Press, 2005.

QUINE, Willard van O. *The Ways Of Paradox And Other Essays*. New York: Random House, 1966.

RADHAKRISHNAN, Sarvepalli. "The Vedanta Philosophy and the Doctrine of Maya". *International Journal of Ethics*, pp. 431-451, vol. 24, n. 4, 1914.

REDHEAD, Michael. *Incompleteness, Nonlocality, And Realism: A Prolegomenon To The Philosophy Of Quantum Mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1987.

REICHENBACH, Hans. *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*. Berkeley: University of California Press, 1944.

ROBINSON, Howard. "Dualism". Em: ZALTA, Edward N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2012.

ROSENFELD, Leon. "Misunderstandings about the Foundations of Quantum Theory". Em: KÖRNER, Stephan (ed.). *Observation and Interpretation: A Symposium of Philosophers and Physicists*. New York: Academic, pp. 41-45, 1957.

ROSS-BONNEY, Ann A. "Does God Play Dice? A Discussion Of Some Interpretations Of Quantum Mechanics". *American Journal of Physics*. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1974.

RUSSELL, Bertrand. "On Denoting". *Mind*, 14, pp. 479-493, 1905.

SAUNDERS, Simon. "Many Worlds? An Introduction". Em: SAUNDERS, Simon; BARRETT, Jonathan; KENT, Adrian; WALLACE, David (eds.). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*. New York: Oxford University Press, 2010.

SCHIFF, Leonard I. *Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1949.

SCHRÖDINGER, Erwin R. J. "Discussion Of Probability Relations Between Separated Systems". *Proceeding sof the Cambridge Philosophical Society*, vol. 31, pp. 555-562, 1935.

SCHRÖDINGER, Erwin R. J. "The Present Situation In Quantum Mechanics" (1935). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 152-167, 1983.

SCHRÖDINGER, Erwin R. J. "What is life? The Physical Aspect of the Living Cell", 1944. Em: SCHRÖDINGER, Erwin R. J. *What is Life & Mind and Matter*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

SCHRÖDINGER, Erwin R. J. *My View of the World*. Cambridge: Cambridge University Press, 1964.

SHIMONY, Abner. "Role of the Observer in Quantum Theory". *American Journal of Physics*. American Association of Physics Teachers, vol. 31, n. 10, pp. 755-773. 1963.

SHIMONY, Abner. "Contextual Hidden Variables Theories and Bell's Inequalities". *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 35, n. 1, pp. 25- 45, 1984.

SMITH, Quentin. "Why Cognitive Scientists Cannot Ignore Quantum Mechanics". Em: SMITH, Quentin; JOKIC, Aleksandar. *Consciousness: New Philosophical Perspectives*. New York: Oxford University Press, pp. 409-446, 2003.

SQUIRES, Euan J. "One Mind or Many: A Note on the Everett Interpretation of Quantum Theory". *Synthese*. Kluwer Academic Publishers, vol. 89, n. 2, pp. 283-286, 1991.

SQUIRES, Euan J. "Quantum Theory and the Relation between the Conscious Mind and the Physical World". *Synthese*, Kluwer Academic Publishers, vol. 97, n. 1, pp. 109-123, 1993.

STAPP, Henry P. "Are Superluminal Connections Necessary?". *Nuovo Cimento* 40B, pp. 191-205 (1977).

STAPP, Henry P. "Whitehead, James, and the Ontology of Quantum Theory". *Mind & Matter*, vol. 5, n. 1, pp. 83-109. Imprint Academic, 2007b.

STAPP, Henry P. *Mind, Matter And Quantum Mechanics*. Berlin: Springer, 2009.

STAPP, Henry P. *Mindful Universe: Quantum Mechanics And The Participating Observer*. Springer, Berlin, 2007a

STAPP, Henry. "The Copenhagen Interpretation". *American Journal Of Physics*, 40, pp. 1098-1116, 1972.

STÖLTZNER, Michael. "Opportunistic Axiomatics – von Neumann on the Methodology of Mathematical Physics". Em: RÉDEI, Miklós; STÖLTZNER, Michael. (eds.). *John von Neumann and the foundations of Quantum Physics*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 35-62, 2001.

STYER, Daniel F.; BALKIN, Miranda S.; BECKER, Kathryn M.; BURNS, Matthew R.; DUDLEY, Christopher E.; FORTH, Scott T.; GAUMER, Jeremy S.; KRAMER, Mark A.; OERTEL, David C.; PARK, Leonard H.; RINKOSKI, Marie T.; SMITH, Clait T.; WOTHERSPOON, Timothy D. "Nine Formulations Of Quantum Mechanics". *American Journal of Physics*. American Association of Physics Teachers, vol. 70 n. 3, pp. 288-297, 2002.

SZILÁRD, Leó. "On The Decrease Of Entropy In A Thermodynamic System By The Intervention Of Intelligent Beings" (1929). Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 301-310, 1983.

TARSKI, Alfred. "The Concept Of Truth In Formalized Languages". Em: TARKSI, Alfred. *Logic, Semantics, Metamathematics: Papers From 1923 To 1938*. Oxford: Clarendon Press, pp. 152-278, 1956.

VON NEUMANN, John (1932). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press, 1955.

WEBER, Michel; WEEKES, Anderson (eds.). *Process Approaches to Consciousness in Psychology, Neuroscience, and Philosophy of Mind*. Albany: State University of New York Press, 2009.

WEBER, Renée. "Dialogues With Scientists And Sages: The Search For Unity", (1986). Em: NICHOL, Lee (ed.). *The Essential David Bohm*. London: Routledge, pp. 139-157, 2003.

WEIZSÄCKER, Karl F. "Komplementarität und Logik". *Die Naturwissenschaften*, vol. 42, 1955.

WEIZSÄCKER, Karl F. "Niels Bohr and complementarity: the place of the classical language". Em: BASTIN, Ted (ed.). *Quantum Theory and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 23-31, 1971.

WHITAKER, Andrew M. B. *Einstein, Bohr and the quantum dilemma*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

WHITEHEAD, Alfred N. *An Enquiry Concerning the Principles of Natural Knowledge*. (1925, 2. Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

WHITEHEAD, Alfred N. *Process And Reality: An Essay In Cosmology*. (1928). New York: Free Press, 1978.

WIGNER, Eugene P. "Remarks On The Mind-Body Question", 1961. Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 168-181, 1983.

WIGNER, Eugene P. "The Problem of Measurement", *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington, pp. 153-170, 1967. Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 324-341, 1983.

WIGNER, Eugene P. "Two Kinds of Reality". *The Monist* 48, pp. 248-264, 1964.

WILBER, Ken. *The Spectrum of Consciousness*. Wheaton: Quest Books, 1997.

YABLO, S. "Does ontology rest on a mistake?". *Proceedings of the Aristotelean Society*, 72 pp. 229-261, 1998.

ZEH, Hanz-Dieter. "The Problem Of Conscious Observation In Quantum Mechanical Description". *Foundations of Physics*, vol. 13, pp. 221-233, 2000.

ZEH, Heinz-Dieter. "On The Interpretation Of Measurement In Quantum Theory", *Foundations of Physics*, 1, pp. 69-76, 1970. Em: WHEELER, John A.; ZUREK, Wojciech H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, pp. 342-349, 1983.