

A Crise Epistemológica da Teoria Quântica: Implicações Filosóficas do Desenvolvimento da Nova Física

[The Epistemological Crisis of Quantum Theory: Philosophical Implications of the Development of the New Physics]

João Renato Amorim Feitosa*

Resumo: Podemos facilmente constatar que o desenvolvimento das principais teorias do conhecimento do período moderno da filosofia ocidental guardou uma estreita relação com o *status quo* do desenvolvimento da matemática e das ciências de uma maneira geral. Essa característica é sobretudo evidente no projeto kantiano de fornecer as bases filosóficas para explicar a possibilidade da geometria (euclidiana) e da física newtoniana, as quais Kant fundamentou sob princípios os quais considerou condições *sine qua non* do conhecimento humano. Contudo, a física que se desenvolveu na primeira metade do século XX apresentou situações em que os próprios físicos tiveram que se questionar acerca dos problemas epistemológicos envolvidos na descrição, interpretação, e em última instância, na comunicação dos fenômenos observados, de modo que alguns conceitos caros à epistemologia tradicional se mostraram ora inválidos, ora ineficientes para explicar a possibilidade de conhecimento objetivo diante desse novo conjunto de fenômenos. Portanto, gostaríamos de apresentar de maneira breve de que modo ocorre essa contraposição entre epistemologia tradicional e teoria quântica, bem como o modo como os físicos Niels Bohr e Werner Heisenberg lidaram com a nova situação que se apresentava.

Palavras-chave: Atomismo. Contingência. Criticismo. Determinismo. Previsibilidade.

Abstract: We can easily verify that the development of the main theories of knowledge in the modern period of Western philosophy was closely related to the *status quo* of the development of mathematics and science in a general way. This characteristic is especially evident in the Kantian project of providing the philosophical basis to explain the possibility of (Euclidean) geometry and Newtonian physics, which Kant based on principles which he considered *sine qua non* conditions of human knowledge. However, the physics that have developed in the first half of the 20th century presented situations in which physicists themselves had to question themselves about the epistemological problems involved in the description, interpretation, and ultimately, in the communication of observed phenomena, so that some concepts dear to traditional epistemology proved to be either invalid or inefficient to explain the possibility of objective knowledge in the face of this new set of phenomena. Therefore, we would like to briefly present how this contrast between traditional epistemology and quantum theory occurs, as well as how physicists Niels Bohr and Werner Heisenberg dealt with the new situation that was presented.

Keywords: Atomism. Contingency. Criticism. Determinism. Predictability.

*Doutorando em filosofia pela Universidade de Brasília (PPG-FIL/UnB) e graduando em química pela mesma instituição, obteve ainda diplomas de bacharel e licenciado em filosofia (2016) e de mestre em filosofia (2019). E-mail: joaofeitosa-fil@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8784-7233>.

1. Kant e o paradigma científico da modernidade

Uma característica marcante entre algumas das principais obras de filósofos que pensaram o problema do conhecimento no período moderno da história da filosofia ocidental (guardadas as devidas especificidades e intenções teóricas dos filósofos particulares) consistiu numa tentativa de elaboração sistemática de teorias sobre o modo como podemos conhecer, seja com relação à elaboração de uma teoria da sensibilidade, seja com relação ao modo como elaboramos pensamentos, juízos, ou proposições acerca das coisas que desejamos conhecer. Mais do que isso e um passo à diante dessa primeira intenção, algumas entre elas buscaram se perguntar acerca do próprio caráter de *justificação* do conhecimento, isto é, o que propriamente confere o caráter de *conhecimento verdadeiro*, ou ainda *validade objetiva* a determinados tipos de conhecimento ou domínios de objetos do conhecimento e a outros não. Nesse sentido, é claro que o desenvolvimento da ciência enquanto um novo conjunto de métodos para se obter conhecimento, representou para a modernidade um modelo que orientou, ou no mínimo inspirou a construção das teorias do conhecimento naquele período. Não é difícil mostrar, por exemplo, que nas *Meditações Metafísicas* de Descartes o mesmo afirma ter orientado sua investigação *more geometrico* ou à maneira dos geômetras, ou ainda que no *Ensaio Acerca do Entendimento Humano* Locke tenha afirmado que “numa época em que são produzidos mestres como Huygens e o incomparável Newton consiste em suficiente ambição ser empregado como um trabalhador inferior, que limpa o terreno e remove o entulho” (LOCKE, 1973, p. 143). De maneira bastante generalizada, podemos dizer que esse espírito teórico percorre um fio condutor que passa pelos *Novos Ensaio Acerca do Entendimento Humano* de Leibniz, pela *Investigação Acerca do Entendimento Humano* de Hume e conduz à *Crítica da Razão Pura*¹ de Kant.

Esse traço essencial da filosofia kantiana, qual seja, uma estreita relação com o desenvolvimento das ciências particulares em sua época, pode, contudo, ser rastreado não somente nos textos do período crítico, mas desde seus textos iniciais até o *Opus postumum*. Como nos mostra Friedman (1992), boa parte do desenvolvimento da carreira filosófica de Kant se deteve sobre uma tentativa de conciliar os resultados obtidos pela física newtoniana com as principais assunções da escola Leibniz-Wolffiana (no período pré-crítico), bem como de fornecer uma fundamentação metafísica para a física newtoniana (no período

¹Doravante, KrV, sigla para o nome da obra em alemão (*Kritik der reinen Vernunft*).

crítico). Seguindo a mesma tendência, o *Opus postumum* revela uma tentativa por parte do filósofo de acompanhar e fornecer fundamentação filosófica aos principais resultados obtidos pela química até então, o que se evidencia em sua intenção de executar uma “dedução do éter” e discutir a validade e aplicabilidade do princípio de permanência da substância, objetivos associados ao seu projeto mais geral de executar uma transição dos princípios metafísicos da ciência da natureza para a física. Desse modo, o fato de que as ciências são bons exemplos de conhecimento bem sucedido não implica na afirmação de que esse conhecimento é auto fundamentado, isto é, que a sua própria lógica de justificação interna é suficiente para a explicação de sua possibilidade. Para que seja possível uma análise epistemológica do conhecimento científico não basta a mera exposição das regras de funcionamento de sua metodologia interna, é preciso remontar o problema a um nível mais fundamental, que é o da própria relação entre sujeito e objeto. Não basta ao cientista a tentativa de fundamentar o conhecimento científico dizendo que a experiência o confirma, é preciso ainda que ele demonstre por que a experiência deve ser assim constituída e não de um outro modo possível. Assim, para Kant, ainda que se possa exemplificar a validade de uma lei por meio de uma experiência, a última instância da fundamentação do conhecimento científico se dá em terreno filosófico, mais precisamente pelo estabelecimento das regras fundamentais pelas quais o entendimento humano se orienta em seu conhecimento de objetos, bem como as condições *sine qua non* da aplicabilidade dessas regras à experiência.

Não menos importante é o modo como Kant avaliou o caráter de cientificidade da Química do século XVIII. No prefácio aos *Princípios metafísicos da ciência da natureza*, Kant afirma em relação a esta ciência que “[...] a totalidade [dos conhecimentos] não merece, em sentido estrito o nome de ciência; pelo que a química devia se chamar antes arte sistemática, e não ciência.” Já no prefácio à segunda edição da *KrV* (1787) Kant apresenta o procedimento de Stahl como um exemplo de conhecimento que entrou para o “caminho seguro de uma ciência”: “[...] ou quando, mais recentemente, Stahl transformou metais em cal e esta, por sua vez, em metal, tirando-lhes e restituindo-lhes algo, foi uma iluminação para todos os físicos”. Ernst Stahl havia publicado em 1723 sua obra principal, os *Fundamentos de Química*, na qual desenvolveu a teoria do flogisto. Stahl desenvolve uma teoria na qual se tenta explicar determinadas transformações qualitativas das reações químicas a partir da concepção de uma espécie de “matéria” pertencente aos corpos combustíveis, a “matéria do fogo” ou *flogisto*, que seria liberada ao ar durante o processo de combustão.

O procedimento descrito por Kant é a calcinação², técnica muito comum entre os químicos do século XVIII (inclusive Stahl), a qual foi gradativamente sendo associada ao uso da balança e fazendo a Química ir aos poucos tomando um caráter mais quantitativo, ainda que naquele momento fosse predominantemente qualitativa. Tanto a ausência de uma nomenclatura comum quanto esse caráter qualitativo preponderante fizeram com que Kant em 1786 enxergasse a Química da época como um agregado de conhecimentos empíricos, que por não serem regidos por nenhum princípio que os unifique, não são suficientes para fazer de seu conjunto uma ciência genuína. De fato, somente entre os anos 1787 e 1789 existe um esforço conjunto entre Lavoisier, Bertholet, Fourcroy e Guyton no sentido da elaboração de uma nomenclatura que fosse aceita de maneira geral, sendo finalmente em 1789 publicado o *Tratado elementar de química* que apresenta a “lei da conservação das massas”. Já na *Metafísica dos Costumes* em 1797, Kant afirma que “[...] o químico diz: só há uma química (a de Lavoisier)”, o que mostra que o filósofo alemão já se dava conta de sua importância e tentava assimilar essas ideias em âmbito filosófico.

Para Kant, portanto, a física newtoniana representou tanto um conhecimento bem sucedido quanto um modelo metodológico, ao qual o filósofo buscou fornecer as condições de possibilidade de sua aplicação ao conhecimento de coisas e se perguntou em que sentido pode-se dizer que ela representa um conhecimento efetivo da natureza. Dessa forma, a questão principal que a KrV deve responder, qual seja, *como são possíveis juízos sintéticos a priori*, diz respeito a uma classe específica de juízos ou proposições que possuem relação de referência e significado diferente das demais, de modo que um bom exemplo de sua aplicação está na física newtoniana. Vale ressaltar que Kant foi contrário a uma aplicação direta do método matemático para se fazer filosofia, como fica evidente já no texto de 1764³ e posteriormente melhor sistematizado na *Disciplina da Razão Pura*, sobretudo quando se trata da obtenção de certeza nas duas áreas, portanto, a KrV não consiste em um resultado da aplicação do método matemático para se construir teorias, mas pergunta-se acerca dos próprios pressupostos epistemológicos das construções matemáticas. Diante da evidente eficiência descritiva da física newtoniana, seja por sua notável capacidade de prova empírica, seja por sua característica de ser capaz de adiantar a experiência em determinados aspectos dela, Kant achou necessário fornecer

²Um exemplo comum desse procedimento é a calcinação do calcário a fim de obter cal virgem. Após o aquecimento a altas temperaturas, observava-se que o produto era formado em maior ou menor quantidade que a do reagente inicial, e daí então a teoria de que algo era retirado ou restituído ao material quando submetido àquelas temperaturas: o flogisto.

³*Investigação sobre a evidência dos princípios da teologia natural e da moral.*

uma fundamentação filosófica da sua possibilidade, pois como afirma o próprio filósofo, “para que se torne possível a aplicação da matemática à doutrina dos corpos, importa apresentar primeiro os princípios da construção de conceitos, que pertencem à possibilidade da matéria em geral”⁴. Essa fundamentação filosófica do conhecimento científico está apresentada sobretudo na *Analítica dos Princípios* da *Crítica da Razão Pura* e na análise sistemática do conceito de matéria que Kant erigiu nos *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*. Para os fins da presente investigação, gostaríamos de elencar alguns dos pressupostos fundamentais que orientaram a elaboração da teoria da ciência de Kant, para assim avançar ao núcleo do problema propriamente dito: 1. Kant erige sua teoria do espaço e do tempo baseado na geometria euclidiana e aceita a física newtoniana como a ciência do movimento; 2. Kant acreditou haverem conceitos fundamentais inerentes à cognição humana, necessários e universais, para qualquer conhecimento humano de objetos, como as categorias de substância e causalidade; 3. Kant acreditava na divisibilidade infinita da matéria, bem como acreditou na existência do éter para a explicação da química como ciência. Tido por muitos como o principal filósofo da ciência da modernidade, gostaríamos de tomar esses pressupostos kantianos para analisar o modo como a epistemologia moderna foi repensada diante do desenvolvimento da física no século XX.

2. Positivismo Lógico e Física Quântica

Kant aparece assim como um dos mais relevantes filósofos da modernidade no que diz respeito à elaboração de teorias do conhecimento que pretenderam fornecer uma fundamentação filosófica ao conhecimento científico. Os filósofos do chamado *idealismo alemão* foram amplamente influenciados pela filosofia de Kant em seus diferentes domínios, testando os limites do *criticismo* em seus conceitos fundamentais e erigindo propostas de solução aos problemas que o sistema crítico de Kant não foi capaz de responder, dado que declarava a própria razão incapaz de resolvê-los. Trabalhos como os de Reinhold, Schultze, Maimon e Beck compõem o período mais imediato da recepção da filosofia kantiana no cenário universitário alemão. Alguns como Reinhold e Beck buscavam reinterpretar o criticismo em seus pontos mais polêmicos, como os conceitos de *coisa em si* e *apercepção originária*, enquanto outros apresentavam

⁴Prefácio dos *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*.

recensões céticas ou tentavam reconstruir a crítica de modo a lidar com aqueles pontos polêmicos, como Schultze e Maimon, ou ainda filósofos como Jacobi, que se opunham totalmente ao criticismo kantiano acusando-o de demasiado subjetivo, outros rejeitando o idealismo transcendental como posição epistemológica verificável, ou ainda por uma aceitação daquilo que Kant havia mostrado como inviável ao conhecimento humano: a confiança numa *intuição intelectual* como princípio para a fundamentação do conhecimento⁵. Já naquilo que Könke chama de “período neokantiano da filosofia universitária alemã”⁶, isto é, desde os anos 1870 até a virada do século XIX, filósofos como Cohen, Fischer, Riehl, Paulsen, Erdmann e Laas (entre inúmeros outros) envolveram-se com problemáticas surgidas das limitações do sistema kantiano, sejam relativas à filologia desse sistema, sejam relativas às próprias teses que ambiciona, ou ainda a problemas biográficos acerca de sua gênese. Contudo, como ressalta Könke⁷, a multiplicidade de atos acadêmicos relacionados à Kant neste período se deve não somente ao predomínio de um movimento neokantiano, mas também porque a discussão crítica de Kant tornou-se tema central no ensino de filosofia da época. Sob este ponto de vista, o historiador indica uma passagem gradual do período neokantiano para o período *positivista* da filosofia alemã, o qual se orientava pela temática de partir de “problemas puramente materiais”, isto é, tonar a filosofia científica. Observa-se assim que ocorre nesse período específico da história da filosofia alemã uma disputa entre *materialismo* e *idealismo transcendental* para a fundamentação das ciências, entre posições epistemológicas *subjetivistas* e *objetivistas*, algumas mais voltadas para uma análise formal da linguagem, outros para as condições de representação no conhecimento humano, *realismo* e *idealismo empírico*, *racionalismo* e *empirismo*.

O assim chamado *positivismo lógico*, que se desenvolve a partir da segunda década do século XX, também apresenta problemas desafiadores à filosofia transcendental e se apresenta como crítico daquilo que reverberou do neokantismo na filosofia do início do século XX⁸. Não obstante essa guinada ao empirismo lógico na primeira metade do século XX, este é também o período

⁵Como por exemplo Fichte na *Fundação de toda a Doutrina da Ciência* (1794) parece apresentar sua releitura própria da *apercepção originária* de Kant, explicando a partir da relação do sujeito como objeto de seu próprio conhecimento, a intuição de si mesmo como auto-gerada pelo *eu*: “O eu põe originariamente, pura e simplesmente, o seu próprio ser” (p. 98, §10). Já Kant afirma que “[...] tenho consciência de mim próprio [...] na unidade sintética originária da apercepção, não como apareço a mim próprio, nem como sou em mim próprio, mas tenho apenas consciência que sou. Esta *representação* é um *pensamento* e não uma *intuição*.” (KrV B157).

⁶Veja KÖNKE, 2011, p. 397. Para mais detalhes, consultar a bibliografia.

⁷Ibidem.

⁸Um bom exemplo está no debate entre Friedrich Waismann e D.M MacKinnon, no qual o primeiro faz oposição às teses kantianas que o último sustenta, em *Verifiability* (1945).

em que mudanças significativas estão acontecendo na física. Como a *Análise Transcendental* oferece o ambiente semântico-transcendental para a validação objetiva do conhecimento científico numa época em que gozavam do predicado de científicas a física newtoniana e já há muitos séculos a *geometria euclidiana*, disso se seguiria que o advento da mecânica quântica e de geometrias não-euclidianas e o novo conjunto de experimentos e axiomas surgidos com esse desenvolvimento, implicariam igualmente na invalidade de alguns pressupostos fundamentais da *filosofia transcendental* diante das alterações de significado que as “descobertas” científicas forçam ao revelar um novo domínio no conjunto da experiência. A ciência impõe com seu desenvolvimento a alteração do significado de conceitos como *matéria, espaço e tempo*; a consequência filosófica disso é o surgimento de problemas epistemológicos como *verificação, justificação*, e em última instância a constituição própria de uma *experiência*. Essa relação entre a teoria do conhecimento de Kant e os paradigmas científicos de sua época sugere alguns problemas sobre os quais vários intérpretes que se propuseram a pensar uma atualização da filosofia transcendental se debruçaram: dado o recente desenvolvimento da nova física após a teoria da relatividade de Einstein, a descoberta de novas geometrias, bem como o desenvolvimento da teoria quântica, não podemos mais aceitar a validade de algumas das principais reivindicações de Kant em sua fundamentação do conhecimento científico. Isso se daria porque o desenvolvimento da ciência revelaria um novo terreno de experiências que, no mínimo, imporiam novos limites a conceitos anteriormente tidos como fundamentais para a compreensão humana do mundo. A *filosofia transcendental* deve enfrentar, portanto, as consequências do surgimento de novos paradigmas nas ciências às quais pretendeu fornecer fundamentação. Como afirmou B. Russell, “a geometria não euclidiana havia minado o argumento da estética transcendental”, e “Cantor eliminou a contradição do conceito de número infinito, acabando assim tanto com as antinomias de Kant como com grande parte das de Hegel” (RUSSELL, 1959, p. 32). Além disso, Russell afirma ainda que “Frege demonstrou como pode deduzir-se a aritmética da lógica pura, sem a necessidade de ideias nem axiomas novos, refutando dessa maneira a afirmação de Kant de que $7+5=12$ é sintético.”. O movimento positivista surge como crítica da possibilidade de se haver uma “metafísica da ciência”, ou que a última instância de fundamentação da ciência deveria se dar a partir de princípios filosóficos. Moritz Schlick afirma que a filosofia é a “a atividade mediante a qual se descobre ou determina os sentidos dos enunciados”, e, portanto, não cabe a ela dar as bases do edifício da ciência pois foi um erro supor que “as bases eram formadas por proposições filosóficas (as pressuposições da teoria do conhecimento) e coroada por uma

cúpula de proposições filosóficas (chamada metafísica)” (SCHLICK, 1959, pp. 56-57). Existe, portanto, uma concepção acerca da inutilidade da metafísica e das disputas dela oriundas, podendo a lógica e a análise da linguagem fornecerem ferramentas mais úteis e mais seguras para o estudo do conhecimento científico. Assim, afirma Schlick que “a metafísica se afunda não porque a realização de suas tarefas seja uma empresa superior à razão humana (como pensava Kant, por exemplo), senão porque não há tais tarefas” (Ibidem, p. 57). De maneira semelhante, Rudolf Carnap resume o espírito da postura filosófica comum que dominou o círculo de Viena:

[...] a opinião pela qual a análise lógica é pronunciada sustenta, portanto, que todo suposto conhecimento que pretenda escapar por cima ou por trás da experiência carece de sentido. Esta opinião invalida, em primeiro termo, qualquer especulação metafísica, qualquer conhecimento que se pressuponha obtenível através do *pensamento puro* ou da *intuição pura* que pretendia prescindir da experiência. (CARNAP, 1959, p. 76)

Fica bastante claro, assim, que o movimento positivista surge como crítico do sistema kantiano da filosofia transcendental como base filosófica para o conhecimento científico, e em grande parte tal crítica baseia-se no próprio desenvolvimento da ciência no século XX. O *quantum* de ação, que permitiu uma descrição mais completa da estabilidade do átomo e sua composição, revelou não somente um novo domínio da experiência, mas também estabeleceu limites aos conceitos clássicos, donde sistemas epistemológicos que se baseavam nesses referenciais clássicos (tal como o conceito de espaço e tempo) devem ser postos em xeque. A experiência se mostra como o único referente de validação do conhecimento científico, devendo os antigos sistemas de metafísica serem revistos ou abandonados os pseudo-problemas de uma vez por todas, como afirma Schlick: “daí que o físico não tenha que apelar à filosofia kantiana; suas comprovações conduzem ao mundo exterior empírico que todos conhecemos, não a um mundo transcendente, seus elétrons não são entidades metafísicas (Ibidem, p. 108).” Nota-se assim que essa guinada para o problema da linguagem e da lógica é acompanhada de uma forte tendência ao *realismo empírico* no positivismo lógico primevo, de modo que o significado de conceitos como *puro*, *transcendental*, *coisa em si* e *a priori* pareceu extravagante para os filósofos desse período. Devemos nos atentar, contudo, que uma das principais tarefas críticas de Kant consistiu em modificar o método da metafísica tradi-

onal, de modo que a *ontologia* se converteu em *analítica transcendental*, isto é, a “decomposição de todo o nosso conhecimento a priori nos elementos do conhecimento puro do entendimento” (B 89), de onde se deve concluir que a intenção de Kant com a crítica não foi apenas a tentativa de erigir mais um sistema metafísico acerca do nosso conhecimento de coisas. É preciso, portanto, analisar com parcimônia tanto os argumentos da filosofia kantiana quanto as críticas surgidas com o desenvolvimento da filosofia da linguagem no início do século passado. No entanto, não resta dúvidas de que a física quântica passou por uma “crise epistemológica” devido às situações inusitadas que se apresentaram no âmbito da experimentação e instrumentação científicos, trazendo ao seio da ciência problemas antes tratados separadamente no âmbito da teoria do conhecimento.

A teoria quântica surge a partir dos estudos sobre a radiação do corpo negro (nome dado a materiais postos sob altas temperaturas) que vinham se desenvolvendo desde o final do século XIX, os quais apresentaram sérias dificuldades em descrever o fenômeno da radiação térmica a partir das leis da física clássica e que ganham uma resolução formal definitiva com o trabalho de Max Planck, o qual estabeleceu que a radiação emitida obedecia a uma quantidade limitada de energia que é sempre um múltiplo de um valor discreto, qual seja, a constante de Planck ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$). A partir da interpretação dos resultados obtidos por Planck, Einstein foi capaz de descrever o fenômeno de emissão de elétrons que ocorria ao se incidir energia sobre os metais, o qual foi chamado de *efeito fotoelétrico*. Os estudos de Einstein apresentavam a luz como passível de ser interpretada como formada por pequenos pacotes de energia (os *quanta*) que eram sempre iguais ao produto da frequência da luz incidida sobre o metal pela constante de Planck, isto é, a luz, sob esta perspectiva corpuscular, apresentava características de partícula, ainda que a teoria clássica do eletromagnetismo que havia sido desenvolvida por Maxwell e Lorentz na segunda metade do século XIX permitisse uma descrição completa da luz enquanto onda eletromagnética, e daí a implicação de que a luz poderia possivelmente conter as duas características, isto é, ser tanto onda quanto partícula. O problema da *dualidade onda-partícula* é, portanto, um primeiro indicativo de que a física estava lidando com um novo terreno no âmbito da experiência o qual não se enquadrava mais nas regras impostas pela física clássica, o que ao mesmo tempo implica que a epistemologia clássica teria de lidar com problemas semelhantes, haja vista regras lógicas como o princípio de não contradição aparentemente serem violadas diante dessas novas experiências. Assim, a constante de Planck apresenta uma característica intrinsecamente *descontínua* da matéria e o problema

da *dualidade onda-partícula* um caráter *ambíguo* na descrição dos fenômenos quânticos, a qual implicou em discussões acaloradas e dissensões entre os próprios físicos da época.

As dissensões causadas pela experimentação que surgia tiveram implicações também para a unidade teórica da teoria quântica, a qual se dividiu em diferentes escolas que tinham, naturalmente, abordagens diferentes em relação à natureza da própria matéria, as quais implicaram em diferentes concepções, por exemplo, sobre a estrutura do átomo. Dentre as diversas, podemos destacar as que se seguem⁹: 1) A interpretação ondulatória, que considera o objeto quântico como onda; 2) a interpretação corpuscular, que considera o objeto quântico como uma partícula; 3) a interpretação dualista-realista, que acredita ter o objeto quântico ambas as características; 4) a interpretação da complementaridade, a qual aceita o caráter ondulatório do objeto quântico e explica as características aparentemente corpusculares do fenômeno observado por influência da constante de Planck. Tal situação implicou no ceticismo por parte de grandes físicos como Albert Einstein em relação à consistência teórica do novo domínio da física, de modo que pela primeira vez em muitos anos a física se viu diante de problemas antes restritos ao âmbito da teoria do conhecimento, ou pelo menos evitados pelos físicos como relevantes para a prática científica. Isso não significa, no entanto, que a teoria quântica tenha sido desprovida de uma formalização rigorosa, tal qual a empreendida por John Von Neumann em 1932 em seu famoso *Fundamentos Matemáticos da Mecânica Quântica*, a questão, portanto, era como interpretar esse formalismo¹⁰, o qual apresentava forte apelo estatístico e probabilístico que causava aos físicos acostumados com a teoria clássica uma certa rejeição por não satisfazer certas exigências como previsibilidade e descritibilidade completa dos fenômenos. Se antes o formalismo matemático era suficiente para provar e garantir a assertividade das proposições científicas, na física da primeira metade do século XX, apesar do rigor das demonstrações e seu caráter axiomático, ela não era suficiente para uma explicação completa do próprio comportamento da matéria diante do novo domínio da experimentação que se apresentava.

⁹Essa divisão é feita por Oswaldo Pessoa Júnior (2005, p. 5).

¹⁰Veja por exemplo Max Jammer (1974, p. 9).

3. A proposta de solução de Bohr e Heisenberg

Além do problema relacionado à coesão teórica entre as diferentes escolas advindo sobretudo da interpretação do formalismo matemático, os físicos da época tiveram que lidar com o problema da descrição dos fenômenos quânticos. Niels Bohr foi quem lidou mais de perto com essa questão em diferentes ocasiões, nas quais ele apresentou o problema basicamente em torno de dois aspectos principais: 1) a descrição dos dados obtidos sobre os fenômenos quânticos a partir da experimentação deve ser feita utilizando-se termos clássicos; 2) é impossível separar os acontecimentos no âmbito da experimentação quântica dos instrumentos de medida utilizados para tal fim. O primeiro desses aspectos está relacionado à ligação intrínseca que nossa linguagem possui em relação aos objetos que constituem a nossa experiência corriqueira, isto é, que fazem parte dos acontecimentos cotidianos, os quais podem ser descritos pela física clássica e que se adéquam às regras lógicas e epistemológicas clássicas. Nesse sentido, por mais que a experimentação se torne cada vez mais refinada, não podemos escapar das limitações impostas pela nossa linguagem no momento de descrevê-los, bem como não podemos prescindir da utilização de termos clássicos como *momento*, *posição*, *trajetória*, etc. Por esse motivo, afirmações como “o objeto quântico é tanto onda quanto partícula” ou “o objeto quântico atinge a chapa fotográfica, mas não possui trajetória” nos parecem tão estranhos e autocontraditórios. O segundo aspecto, o qual o próprio físico chamou de problema “observacional” da teoria quântica dá a indicação de uma interferência incontornável do sujeito que mede na própria medida, haja vista o fenômeno quântico se manifestar de acordo com o arranjo instrumental arquitetado pelo cientista, o que quer dizer que, a depender do arranjo arquitetado, o fenômeno quântico pode se manifestar de maneiras diversas. Note, por exemplo, a diferença do arranjo experimental entre uma câmara de Wilson e o famoso experimento de Rutherford, ambos dão características distintas de fenômenos relacionados à natureza do átomo, mas por vias totalmente distintas e disso se segue o problema ligado à compatibilização entre os resultados obtidos sob diferentes condições experimentais: a ausência de um experimento que sirva como modelo incontestável das asserções feitas no domínio teórico entre as diferentes escolas.

Diante desta estranha situação, Bohr propõe a aplicação de um princípio ao qual chamou de *complementaridade*, a fim de dirimir os principais problemas ligados à descrição e experimentação dos fenômenos quânticos. Em linhas gerais, o físico se refere ao princípio como “expressão lógica de nossa situação

no que tange à descrição objetiva nesse campo da experiência”. Nesse sentido, o princípio de complementaridade indicaria as condições lógicas de descrição e interpretação coerente dos fenômenos quânticos, de modo a caracterizar as condições para uma representação inambígua das experiências obtidas. A regra geral que expressa esse princípio é: “os dados obtidos em diferentes condições experimentais devem ser considerados complementares, no sentido de que só a totalidade dos fenômenos esgota as informações possíveis sobre os objetos” (BOHR, 1957 p. 54). Disso se segue que não existiria uma oposição lógica propriamente dita entre considerar o objeto quântico como onda e partícula, haja vista que ambas as características contribuem para o entendimento dos fenômenos se tomadas como complementares, isto é, não excludentes. Insistir numa definição categoria única seria uma exigência derivada mais da postura adotada pelo físico do que uma exigência epistemológica relevante para a caracterização do fenômeno. A definição de fenômeno, por sua vez, também cumpre um papel fundamental para que se desfaçam as aparentes contradições: os físicos não devem tomar esse conceito no seu sentido usual, qual seja, como aquilo que aparece ao sujeito, mas sim em “[...] referência a observações efetuadas em circunstâncias especificadas, incluindo uma descrição de todo o dispositivo experimental” (BOHR, 1957 p. 79). Nesse sentido, o fenômeno quântico não seria simplesmente algo que se manifesta ao aparato experimental, mas sim a soma entre o próprio aparato experimental e a manifestação observada, evitando assim uma desnecessária hipostasiação de uma entidade “escondida” por trás dos fenômenos.

Sob uma perspectiva preliminar, diante de afirmações como “o fenômeno quântico não pode ser descrito independentemente do aparato experimental”, o qual acaba por envolver o físico e sua cognição, poderíamos cogitar que as novas descobertas experimentais reabilitariam posições epistemológicas clássicas tais como o *idealismo transcendental* kantiano ou o *idealismo empírico* de Berkeley, uma vez que essas afirmavam (guardadas as diferenças teóricas específicas) uma dependência do modo como o fenômeno nos aparece e a conformação das faculdades humanas. No entanto, Bohr é reticente em relação a possíveis releituras do fenômeno quântico a partir de posições epistemológicas clássicas, uma vez que as situações que se apresentavam eram tão incomuns que forçavam uma revisão completa dos limites de validade dos nossos conceitos tradicionais, como por exemplo a distinção entre crença subjetiva e conhecimento objetivo a qual Bohr via como uma atitude vaga compartilhada tanto pela escola crítica quanto pela empirista. Assim sendo, o novo domínio no campo da experiência exigiria uma revisão de conceitos-chave da filosofia tradicional,

de modo que o físico entendeu que “a noção de um sujeito último, bem como de concepções como realismo e idealismo, não tem lugar na descrição objetiva tal qual a definimos” (BOHR, 1957, p. 103). A proposta de Bohr, portanto, não se limita a uma mera adaptação dos conceitos tradicionais à nova situação experimental, mas a uma mudança completa da maneira como significamos a própria noção de conhecimento objetivo. Portanto, coadunando com o desenvolvimento da filosofia da linguagem da primeira metade do século passado, o físico entendeu que a análise da linguagem traria resultados mais promissores para a teoria do conhecimento do que as disputas travadas pelas escolas epistemológicas tradicionais (BOHR, 1958 p. 1), e isso implica que a linguagem comum e sua análise, à qual não se pode prescindir na descrição do fenômeno, deve ser de interesse do pesquisador.

Bohr defendeu também que a ambiguidade presente na interpretação do fenômeno quântico pode ser desfeita pela inambiguidade que a informação oferecida pelo equipamento apresenta na detecção dos eventos, assim como pela aplicação da linguagem matemática, que, como dissemos, não apresentou problemas com relação à consistência teórica de suas afirmações, e que, portanto, garantiria um escopo objetivo na descrição dos eventos. É preciso também que se abra mão de uma referência desnecessária ao sujeito cognoscente, evitando assim qualquer tomada de posição que remonte aos termos da epistemologia clássica, tal como sujeito transcendental. Se a formalização matemática é capaz de fornecer o escopo objetivo que a experiência só alcança parcialmente, isso não quer dizer que o físico tenha optado por uma espécie de realismo matemático que desembocaria numa confiança irracional no poder da matemática, mas apenas propôs um modo de enxergá-la como uma ferramenta linguística sofisticada e com alto poder descritivo, diferentemente do modo como Kant, por exemplo, encarou o sucesso da física newtoniana em aplicar a matemática aos fenômenos pela atribuição de um tipo especial de juízos que estariam presentes no método matemático, como pertencendo a um ambiente semântico de justificação privilegiado o qual exigiu uma fundamentação filosófica intrincada e de difícil compreensão. Assim, apesar dos impasses interpretativos, existe uma certa regularidade inerente aos fenômenos quânticos que permitem por exemplo a sua aplicação a outros domínios do conhecimento tal como a química, na qual é possível até mesmo prever determinadas consequências e características reacionais a partir da teoria atômica, como acontece nos cálculos estequiométricos e na descrição das reações orgânicas e seus mecanismos. Note que a teoria atômica é o resultado de uma série de experimentos que, tomados em conjunto, dão unidade teórica às suas asserções, de modo que ainda que tenham sido

obtidos por processos experimentais distintos, se complementam e permitem uma aplicação prática da teoria. Bohr chamou atenção em diferentes ocasiões em que participava de palestras e conferências para a aplicação do princípio de complementaridade em diferentes ciências, como a química, a biologia, e até mesmo a psicologia, mostrando assim que o escopo de influência da teoria quântica se estenderia a diversos outros domínios do saber humano.

Outro cientista que contribuiu para as questões epistemológicas da teoria quântica foi Werner Heisenberg, cujas reflexões também partiram do problema de ter que se descrever os eventos quânticos a partir de conceitos clássicos. Heisenberg lidou mais diretamente com a questão acerca da dificuldade em se descrever propriedades como posição, momento e velocidade tal como é possível operar com a física clássica no estudo dos eventos macroscópicos, de onde constatou que o fator de imprecisão intrínseco aos experimentos realizados derivava de duas fontes principais, quais sejam, a *relação de incerteza* da medida efetuada e o erro aleatório associado comumente a qualquer técnica laboratorial. O físico se empenhou então na tarefa de “traduzir o resultado da observação na linguagem matemática da teoria quântica”, o que permitiria introduzir na formalização aquele fator de imprecisão. Assim, Heisenberg foi capaz de dar uma formalização matemática de caráter estatístico às incertezas associadas a qualquer medida de eventos quânticos, a qual pôde ser expressa a partir de termos clássicos, ainda que não pudesse corresponder às exigências epistemológicas de justificação clássicas, como por exemplo uma descrição causal no espaço e no tempo, dada a impossibilidade de se descrever uma trajetória passada do objeto quântico. Contudo, ainda que tenha sido possível uma descrição em termos clássicos, dado o caráter estatístico das formalizações, isso não significou a garantia de se estabelecer uma regra que permitisse definir e prever casos futuros apoditicamente, de modo que só era possível lidar com funções de probabilidade, as quais no máximo indicam tendências para a ocorrência de um fenômeno. Esse caráter probabilístico da formalização implicaria numa inclusão de afirmações a partir do nosso conhecimento dos fatos, algo que acarretaria numa interferência do sujeito nos eventos, porém, assim como Bohr, Heisenberg acreditou que “o elemento subjetivo contido na função de probabilidade pode ser em prática desprezível quando comparado com a face objetiva”. Sob essa perspectiva, a função de onda conteria tanto o caráter subjetivo do conhecimento incompleto quanto o elemento objetivo da tendência a qual dá indicações de ocorrências no mundo real, isto é, um horizonte de eventos possíveis cuja objetividade pode ser atestada pela repetição numerosa dos experimentos pelos diferentes colaboradores daquele domínio teórico, como é

o caso das diversas aplicações práticas as quais Bohr fazia alusão.

Para Heisenberg, o principal problema que a teoria clássica do conhecimento apresenta consiste na dificuldade em considerar possível uma descrição objetiva que não leve em consideração qualquer referência a um sujeito cognoscente, de modo que qualquer conhecimento genuinamente científico deveria supostamente corresponder a esse critério de objetividade. Porém, segundo Heisenberg, a teoria atômica é capaz de operar sem levar em consideração a mente do físico como parte do fenômeno, o que garantiria a ela um escopo de objetividade particular, ainda que a presença de um elemento subjetivo associado à medida seja inevitável. Assim, é sempre possível prescindir da interferência do sujeito desde que se introduza na formalização matemática o erro associado a essa interferência, o qual consiste nas próprias relações de incerteza. Desse modo, Heisenberg achou desnecessário, assim como Bohr, o tratamento dos problemas interpretativos da teoria quântica pelos termos clássicos, ou seja, ainda que aparentemente o problema da interferência do sujeito nos faça pensar em velhas dicotomias como *realismo* e *idealismo*, *racionalismo* e *empirismo*, o envolvimento com os problemas daí oriundos dependeria somente da postura teórica adotada pelo investigador, dado que os dados experimentais e a formalização matemática seriam por si sós suficientes para a descrição objetiva dos fenômenos. Diante desse cenário, o físico defendia a ideia de que o novo domínio de fenômenos experimentais inéditos dava a ocasião para se reavaliar a velha dicotomia entre sujeito e mundo presente na teoria do conhecimento desde a antiguidade. Heisenberg vê a hegemonia dessa cosmovisão dicotômica “durante os três séculos que a Descartes se seguiram”, à qual associa a origem da posição contrária que Einstein sustentou em relação à aceitação da interpretação de Copenhague da teoria quântica (HEISENBERG, 1957, p. 44). A própria física newtoniana já havia demonstrado a possibilidade de se prescindir da referência a um sujeito cognoscente, pois apresentou as suas provas *more geometrico*, do que se segue que os problemas epistemológicos dos modernos surgiram exclusivamente do modo como sua cosmovisão influenciou na interpretação dos fatos. Note, por exemplo, que Kant achou necessário se erigir uma metafísica da física newtoniana em seus *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, algo que derivou do modo como entendeu as relações de referência e verificação dos juízos na física, e não da física propriamente dita. Nesse sentido, assim como Bohr, Heisenberg entendeu que os novos dados científicos podem ser entendidos de maneira apartada de uma teoria das cognições:

Se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo “ocorre” pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas entre duas observações consecutivas. *Aquele termo diz respeito à componente física do ato de observação mas não à psíquica*, e podemos dizer que a transição do “possível” ao “real” toma lugar tão logo a interação do objeto com o instrumento de medida (e, portanto, com o resto do Mundo) tenha se realizado; *ele nada tem a ver com o ato de registrar o resultado por parte da mente do observador*. (HEISENBERG, 1957, p. 25; ênfase minha)

Em suma, a solução dos impasses epistemológicos surgidos com a teoria quântica por Bohr e Heisenberg concentrou-se sobretudo no *princípio de complementaridade*, o qual tinha como alvo a dissolução de obstáculos lógicos ligados à interpretação e descrição objetiva dos eventos quânticos, e as relações de incerteza, as quais permitiram lidar com o problema da formalização matemática dos eventos em termos clássicos, levando em consideração os erros associados às medidas e a interferência do sujeito na ocorrência dos fenômenos. Ambos afirmavam ser essa interferência desprezível diante da eficácia prática da nova teoria, de modo que não haveria lugar para a teoria clássica do conhecimento diante do novo domínio de eventos descobertos na experiência. O mesmo se passaria em relação às ambiguidades lógicas, as quais, a partir do princípio de complementaridade, seriam parte de uma série de afirmações que ao invés de tratadas como excludentes deveriam ser tomadas em conjunto como consistindo numa descrição completa do fenômeno. A solução dos impasses surgidos com a nova teoria passaria, portanto, não por uma renovação ou atualização das teorias clássicas a fim de adaptá-las à nova situação experimental, mas por um abandono total ao menos do modo de abordagem dos problemas tal como era feito na modernidade, de modo que a análise da linguagem poderia substituir aquelas pretensões com contribuições que teriam muito mais a oferecer à ciência do que as dicotomias entre as posições epistemológicas que mencionamos acima, posição que se alinhou bastante com aquela tomada pelos assim chamados positivistas lógicos do primeiro quarto do século XX. O formalismo matemático nunca foi um problema, pelo contrário, foi o que garantiu à teoria sua consistência e objetividade, de modo que o problema se concentrou sobretudo na interpretação do formalismo, isto é, no modo como a experiência se comportava diante do que as evidências matemáticas apresentavam e vice-versa, ou seja, como formalizar determinadas evidências experimentais em termos matemáticos clássicos.

4. Conclusão

O desenvolvimento das ciências na modernidade influenciou significativamente no modo como os filósofos erigiram as suas teorias do conhecimento. O sucesso da física newtoniana na aplicação de métodos matemáticos para determinar os fenômenos naturais significou uma verdadeira revolução para o pensamento e cosmovisão modernos. Essa relação estreita entre epistemologia e ciência moderna implicou no comprometimento da primeira com os paradigmas da segunda, de modo que as que tiveram mais influência no pensamento posterior, como a teoria do conhecimento kantiana, apoiaram-se fortemente no *status quo* da ciência à época. O grande problema que a teoria do conhecimento científica moderna deve enfrentar consiste no desenvolvimento da própria ciência, a qual, ao revelar novos eventos no domínio da experiência, força a epistemologia a no mínimo precisar rever alguns de seus princípios mais basilares. Porém, isso não significa que o curso do desenvolvimento científico esteja isento de contratempos epistemológicos e questões filosóficas de maneira geral, dentre os quais foram abordados aqui uma pequena parcela à qual nos referimos como sendo responsáveis por uma “crise epistemológica” na teoria quântica: 1) Como lidar com fatos científicos logicamente inconsistentes, como o problema da dualidade onda-partícula? 2) Como interpretar o formalismo da mecânica quântica, isto é, com aplicá-la ao real se em várias ocasiões ela só é capaz de lidar com afirmações meramente probabilísticas? 3) Como comunicar os eventos quânticos em termos clássicos, se não é possível falar, por exemplo, em uma trajetória passada do objeto quântico? Problemas como esses trouxeram para o âmbito da física questões tratadas desde a modernidade no domínio filosófico, tais como objetividade e justificação e até mesmo problemas ontológicos como a essência do real. A teoria quântica não implicou somente em uma nova concepção do real, mas também forçou os físicos a se perguntarem acerca dos próprios limites da física clássica, o que acabou por dividi-los em diferentes escolas, cada uma com uma orientação diferente em relação ao modo de interpretar os eventos. Tal era a situação das diferentes escolas metafísicas à época de Kant, as quais o filósofo alemão criticou por não compartilharem uma das marcas mais fundamentais, segundo o filósofo, de um conhecimento genuinamente científico: a concordância e a coesão entre os diferentes colaboradores. Contudo, o formalismo matemático e as aplicações práticas da teoria quântica apontavam para uma eficiência teórica incontestável, dirimindo assim o problema acerca do caráter objetivo de suas afirmações, mas remanescendo o

problema interpretativo. Nesse sentido, Max Jammers fez a seguinte constatação:

Embora a mecânica quântica exija uma revisão drástica de conceitos realmente fundamentais da física tradicional e da epistemologia, seu aparato matemático ou, mais geralmente, *seu formalismo abstrato parece estar firmemente estabelecido*. De fato, nenhum outro formalismo de estrutura radicalmente diferente foi geralmente aceito como uma alternativa. *A interpretação desse formalismo, no entanto, é hoje, quase meio século após o advento da a teoria, ainda uma questão de dissensão sem precedentes*. Na verdade, é de longe o problema mais controverso da pesquisa atual nos fundamentos da física e divide a comunidade de físicos e filósofos da ciência em numerosas "escolas de pensamento" opostas. (JAMMER, 1974, pp. 9-10; ênfase minha; tradução minha)

A posição dos teóricos de Copenhague, a qual discutimos no tópico anterior, foi bastante clara em relação às limitações dos conceitos da epistemologia clássica, qual seja, a situação atual exige que pensemos novas formas de interpretar a velha dicotomia sujeito-objeto ao se tratar do problema do conhecimento. Contudo, devemos pensar também até que ponto a teoria quântica foi capaz de avançar no sentido de dar soluções aceitáveis aos problemas e posições epistemológicas clássicas, isto é: em que sentido os físicos e filósofos que se propuseram a pensar a teoria quântica foram capazes de substituir as teorias clássicas? O positivismo lógico e o encaminhamento dos problemas filosóficos tradicionais como problemas linguísticos com a assim chamada "virada linguística" encaminharam os problemas epistemológicos para um terreno teórico mais fértil em se tratando dos novos desafios no campo da experimentação? A incontornável interferência do sujeito nas investigações dos fenômenos quânticos nos faria retornar a posições como o idealismo em suas diferentes vertentes? Todas essas questões convidam tanto os epistemólogos quanto os físicos e cientistas de uma maneira geral a pensarem, em última instância, nas condições ou pressupostos que orientam o que chamamos de *realidade objetiva*, a qual desde os primórdios da filosofia ocidental tem ocupado a mente dos seres humanos em sua busca incessante em determinar o real. A antiga relação entre física e filosofia parece estar longe de chegar a um termo, de modo que problemas filosóficos e científicos continuam a compartilhar de uma origem e busca comuns, ora pelo surgimento de um novo domínio na experiência, ora

por uma mudança radical nos pressupostos e orientações epistemológicos.

Referências

- BASSALO, José Maria F. *Eletrodinâmica Quântica*. 2a Edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- BITBOL, Michel; KERZBERG, Pierre; PETITOT, Jean. (eds.) *Constituting Objectivity: Transcendental Perspectives on Modern Physics*. The Western Ontario Series in Philosophy of Science – Netherlands: Springer Sciences Business Media, 2009.
- BOHR, Neils. *Atomic Theory and the Description of Nature*. New York: Cambridge University Press, 1961.
- _____. *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. Bungay, Suffolk: Richard Clay and Company, 1963.
- _____. *Ensaaios 1932 – 1957: Física atômica e conhecimento humano*. Tradução: Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2008.
- BRAGA, Rubem. *A percepção originária de Kant na física do século XX*. Brasília: Editora UnB, 1992.
- BRITTAN Jr., GORDON G. “Kant and the quantum theory” – in: P. PARRINI (ed.), *Kant and Contemporary Epistemology* (131-155). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- CARNAP, Rudolf. The Elimination of Metaphysics through Logical Analysis. Translated by Arthur Pap. In: AYER, A. J. *Logical Positivism*. New York: The Free Press, 1959.
- CRULL, Elise and BACCIAGALUPPI, Guido. *Grete Herman: Between Physics and Philosophy*. Netherlands: Springer Sciences Business Media, 2016.
- EINSTEIN, A. *O significado da Relatividade*. Tradução: professor Mário Silva, Universidade de Coimbra. Lisboa: Gradiva, 2003.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. São Paulo: Editora Campus, 23a tiragem.
- FAYE, Jan. and FOLSE, Henry J. (orgs). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Boston Studies in Philosophy of Science. Library of Congress: 1993.
- _____. *Niels Bohr: his heritage and legacy*. Boston Studies in Philosophy of Science. Library of Congress: 1991.
- GAZZINELLI, Ramayana. *Teoria da Relatividade Especial*. 2a Edição. – São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2009.
- HEELAN, Patrick A. *Quantum Mechanics and objectivity*. The Hague: Martinus Nijhoff, 1965.
- HEISENBERG, Werner. *Física e Filosofia*. Trad. Jorge Leal Ferreira. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1981.
- _____. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Transl. by Karl Eckart F.C. Hoyt. Ontario: Dover Publications, 1949.
- _____. *A parte e o Todo*. Tradução de Vera Ribeiro. – Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- _____. *A ordenação da Realidade*. Trad. Marco Antônio Casanova. – Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2009.
- JAMMER, Max. *The philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of QM in historical perspective*. New York: John While and Sons, 1974.
- KANT, Immanuel. *Crítica da Razão Pura*. 7a Edição. Tradução de Manuela Pinto dos Santos e Alexandre Fradique Morujão. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.
- _____. *Princípios metafísicos da ciência da natureza*. Tradução de Artur Morão. Rio de Janeiro: Edições 70, 1990.
- KAUARK-LEITE, Patrícia. *Théorie quantique et philosophie transcendantale: dialogues possibles*. Paris: Hermann Éditeurs, 2012.
- LOCKE, John. *Ensaio acerca do Entendimento Humano*. Trad. de Anoar Aiex. São Paulo: Abril Cultural, 1973. (Coleção Os Pensadores)
- LOSEE, John. *Complementarity, Causality and Explanation*. New Jersey: Transaction Publishers, 2013.
- MENEZES, Djacir Lima. *O problema da realidade Objetiva*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1971.
- NIELSEN, J. Rud. (ed.) *Niels Bohr collected works*. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1986.
- ORTOLI, Sven. PHARABOD, Jean-Pierre. *Introdução à física quântica*. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986.
- PESSOA Jr, Oswaldo. *Conceitos de física quântica*. Vols. I e II. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- PETRUCCIOLI, Sandro. *Atoms, Metaphors and Paradoxes: Niels Bohr and the construction of a new physics*. New York: Cambridge University Press, 1993.
- RUSSELL, Bertrand. Logical Atomism. In: AYER, A. J. *Logical Positivism*. New York: The Free Press, 1959.

SCHLICK, Moritz. *The Turning Point in Philosophy*. Translated by David Rynin. In: AYER, A. J. *Logical Positivism*. New York: The Free Press, 1959.

Recebido: 29/03/2022

Aprovado: 10/04/2022

Publicado: 30/04/2022