



A dualidade onda-partícula na perspectiva de Niels Bohr

The wave-particle duality in Niels Bohr's perspective

DOI: 10.20873/rpv7n2-51

Rodolfo Alves Carvalho Neto

Orcid ID: 0000-0002-9480-2842

Email: rodolfo@uefs.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo discutir a Dualidade Onda-Partícula e o Princípio da Incerteza como expressões de uma ideia mais geral de natureza interpretativa: o Princípio de Complementaridade, formulado pelo físico dinamarquês Niels Bohr. Trata-se, conforme defenderemos, de uma interpretação antirrealista que é fundada na objetividade da Física. A impossibilidade de utilização simultânea das leis de conservação de energia e momento (asserção de causalidade) e da coordenação espaço-temporal será problematizada, analisando-se uma possível incompatibilidade desta complementaridade com o antirrealismo. Discute-se, ainda, o processo de medição quântica numa perspectiva conceitual e epistemológica, e o significado da constante de Planck, enfatizando a ideia de que, nesta interpretação ortodoxa, o vetor de estado, que contém todas as informações do sistema, tem um significado meramente epistêmico. Assim, no que pese a extraordinária precisão com que a teoria quântica permite prever e comunicar resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido, a teoria não se ocupa de responder o que é o objeto quântico, no sentido ontológico, conferindo-lhe assim seu aspecto antirrealista e, ao mesmo tempo, objetivo.

Palavras-chave

Princípio de Complementaridade. Dualidade Onda-Partícula. Princípio de Incerteza. Antirrealismo. Objetividade.

Abstract

This paper discusses the Wave-Particle Duality and the Uncertainty Principle, taken to be expressions of a more general idea, of an interpretive nature: the Complementarity Principle, formulated by the Danish physicist Niels Bohr. It is, as we will argue, an anti-realist interpretation that is founded on the objectivity of physics. The impossibility of using simultaneously the laws of conservation of energy and momentum (claim of causality) and space-time coordination will be discussed, analyzing a possible incompatibility of this complementarity with anti-realism. The quantum measurement process is also discussed from a conceptual and epistemological perspective, and also the meaning of Planck's constant, emphasizing the idea that, in this orthodox interpretation, the state vector, which contains all the information of the system, has a merely epistemic meaning. Thus, in spite of the extraordinary precision with which quantum theory makes it possible

to predict and communicate results of a measurement in a well-defined experimental context, the theory is not concerned with answering what the quantum object is, in the ontological sense, thus giving it its anti-realistic and, at the same time, objective aspect.

Keywords

Principle of Complementarity. Wave-Particle Duality. Uncertainty Principle. Anti-realism. Objectivity.

1. Introdução

A Mecânica Quântica, também conhecida como Nova Teoria Quântica ou ainda Física Quântica, foi formulada entre 1925 e 1927, a partir dos trabalhos de Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg. Desde então, seu amplo êxito preditivo vem coexistindo com uma controvérsia de interpretação inconclusa (FREIRE; CARVALHO NETO, 1997; FREIRE, 1999; PESSOA, 2003). Trata-se de uma controvérsia científica com fortes implicações filosóficas.

A Mecânica Quântica tem duas partes. A parte objetiva fornece o cálculo de probabilidades que descreve adequadamente a frequência relativa medida nos experimentos. Em outras palavras, está relacionada à capacidade dos seres humanos de preverem e comunicarem resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido (CARVALHO NETO, 2016). A outra parte é a interpretativa, sendo que a teoria pode ser interpretada de várias formas, sem contradições. Uma interpretação é usualmente entendida como um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria, sem afetar em nada as previsões observacionais da teoria (PESSOA, 2003, p. 64).

Este artigo tem como objetivo discutir a Dualidade Onda-Partícula e o Princípio de Incerteza como expressões de uma ideia mais geral, de natureza interpretativa: o Princípio de Complementaridade, formulado pelo físico dinamarquês Niels Bohr, na cidade de Como, na Itália, em 1927 (BOHR, 2000). Trata-se, conforme defenderemos, de uma interpretação *antirrealista* que é fundada na objetividade da Física. O termo “realismo” aplica-se a interpretações que postulam uma realidade bem definida por trás, ou antes, das medidas, quer esta realidade postulada seja corpuscular, ondulatória, ou uma combinação de ambas. Já as interpretações

antirrealistas negam que isso deva ser feito, atendo-se apenas àquilo que é observável ou mensurável, sem especular sobre a natureza última da realidade.

Vale mencionar que o seu ponto de vista epistemológico seria posteriormente estendido para outros domínios fora do escopo da Física (BOHR, 1995), aplicando-se aos pares vitalismo/mecanicismo (p. 15, 77), sentimento/pensamento (p. 34), uso prático da linguagem / definição estrita da palavra (p. 65), compaixão/justiça (p. 103), termodinâmica / mecânica estatística (p. 123) etc., mas tais extensões não serão abordadas no presente trabalho. No entanto, tais extensões revelam um personagem com forte vocação humanística na história da Física dos Quanta.

2. O Debate sobre o primeiro tipo de Complementaridade

Em 1955, Carl von Weizsäcker propôs uma classificação de três tipos de Complementaridade (JAMMER, 1974, p. 102-104; PESSOA, 2003, p. 93-95).

O primeiro tipo expressa uma limitação teórica quanto à utilização simultânea das leis de conservação de energia e momento, que Bohr denominou de “asserção de causalidade” (*claim of causality*), juntamente com a coordenação espaço-temporal, quando as posições dos quanta são medidas (podem ser dos elétrons, fótons, nêutrons, átomos e até moléculas). Trata-se de uma complementaridade entre “definição” e “observação”, conforme as palavras de Bohr:

A própria natureza da teoria quântica nos força assim a considerar a coordenação espaço-temporal e asserção da causalidade, cuja união caracteriza as teorias clássicas, como aspectos complementares, mas excludentes da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição, respectivamente. (BOHR, 2000, p. 137)

Bohr deixou claro que esta renúncia de conciliar tais aspectos excludentes não é uma questão de gosto, volitiva, subjetiva, mas sim fruto do significado da constante de Planck, relacionado ao que chamou de “postulado quântico”, ou seja, a atribuição “a qualquer processo atômico uma descontinuidade essencial” (BOHR, 2000, p. 136). Na conferência na cidade de Como, o dinamarquês destacou que: “o postulado quântico implica uma renúncia com respeito à coordenação espaço-temporal causal de processos atômicos” (idem).

É importante lembrar que na Física Clássica não há impedimento algum de utilizar-se, para um sistema conservativo e isolado, a exemplo de uma colisão perfeitamente elástica de bolas macroscópicas, as leis de conservação de energia mecânica e momento linear do sistema e ao mesmo tempo observar o sistema, atribuindo uma posição bem definida para cada bola. Esta descrição, ao mesmo tempo determinística e com posições bem definidas, é incompatível com a interpretação da complementaridade (FREIRE; CARVALHO NETO, 1997).

No que pese este trabalho não ter o objetivo de analisar a presença das ideias de Kant no pensamento de Bohr, vale a pena dar uma olhada no trabalho de Patrícia Kauark-Leite (2013), no interesse de uma reflexão adicional sobre a complementaridade. Sobre o princípio de causalidade e descrição espaço-temporal ela declara:

Agora, diante da nova situação da mecânica quântica, Bohr propõe através da noção de complementaridade, uma limitação radical à noção mesma de síntese transcendental. Essa limitação atinge o coração da doutrina kantiana do esquematismo, visto que a exigência da composição simultânea dos dois elementos básicos da cognição (intuição mais conceitos) para constituir o objeto do conhecimento não mais se verifica. Contudo, utilizando os mesmos elementos kantianos, Bohr propõe uma outra espécie de síntese muito particular. Uma síntese, digamos, disjuntiva ou complementar, em que as duas exigências não podem estar presentes ao mesmo tempo, mas que são todas as duas necessárias para dar conta de maneira completa do processo quântico. Não há assim em Bohr uma renúncia ao princípio de causalidade ou à intuição espaço-temporal, como é frequentemente afirmado, mas uma renúncia à descrição simultaneamente causal e espaço-temporal dos fenômenos quânticos. (KAUARK-LEITE, 2013, p. 69).

MacKinnon (1985, p. 112) argumenta que, após 1928, Bohr foi abandonando este primeiro tipo de complementaridade, por conta de sua posição antirrealista em relação à Mecânica Quântica. Sabe-se que um sistema conservativo e isolado deve obedecer à lei de conservação de energia e momento linear, ou seja, é o domínio de asserção de causalidade (definição). Ora, aceitar isso, equivale a assumir uma realidade existente independente da observação, o que só seria possível numa interpretação realista. Por isso, Bohr teria abandonado, depois de 1928, este tipo de complementaridade (PESSOA, 2003, p. 94)

Kauark-Leite discorda da interpretação de MacKinnon, como expressou em uma palestra recente. Para a pesquisadora, este primeiro tipo de complementaridade é o cerne e a própria essência da interpretação da complementaridade:

Alguns intérpretes chegaram a afirmar que o Bohr teria abandonado essa coisa que os físicos não entenderam: “complementaridade entre espaço-tempo e causalidade, o que é isso?”. Os físicos passaram batido nessa posição do Bohr, e vão falar que ele inclusive abandonou isso depois, alguns intérpretes falam que isso foi uma confusão que o Bohr criou. Porque é isso que é o kantismo forte, quando ele apresenta a complementaridade entre intuição espaço-temporal e causalidade, isso é forte na posição dele. Eu acho que esta complementaridade é a que está no cerne do princípio da complementaridade dele. A complementaridade das variáveis conjugadas, a complementaridade da descrição onda-partícula, tudo isso é como se fossem instanciações deste princípio mais geral. (KAUARK-LEITE, 2022, 1:20:27 - 1:21:30)

3. A dualidade onda-partícula

O segundo tipo de Complementaridade refere-se a arranjos experimentais incompatíveis que podem ser caracterizados ou como um fenômeno ondulatório, ou como um fenômeno corpuscular, nunca os dois ao mesmo tempo. Porém, ambos são necessários para, quando utilizados de forma complementar, exaurir a descrição dos experimentos, tanto com a matéria quanto com radiação eletromagnética, num nível microscópico. A dualidade onda-partícula, portanto, na visão bohriana, é uma expressão da interpretação da complementaridade. Vejamos a definição que o próprio Bohr apresenta em 1935, no contexto do debate com Einstein, Podolsky & Rosen (EPR):

Na verdade, é apenas a exclusão mútua de dois procedimentos experimentais quaisquer, permitindo a definição inequívoca de quantidades físicas complementares, que fornece espaço para novas leis físicas, cuja coexistência poderia, à primeira vista, parecer irreconciliável com os princípios básicos da ciência. É precisamente essa situação, inteiramente nova no que diz respeito à descrição dos fenômenos físicos, que a noção de complementaridade tem por fim caracterizar. (BOHR, 1981, p. 103-104)

Para ilustrar este pilar da Mecânica Quântica, objeto central deste artigo, numa perspectiva física e epistemológica, recorreremos à análise de um experimento de interferência com elétrons, realizado pelo grupo do físico Akira Tonomura, no Japão (TONOMURA et al. 1989). Trata-se de um experimento análogo ao da dupla fenda, originalmente feito com luz, em 1801, por Thomas Young, mas usando a montagem de um biprisma eletrônico (PESSOA, 2003, p. 160). A essência do experimento se resume ao fato de que elétrons, lançados um por um, após

passarem pelos dois caminhos abertos, chegam pontualmente, e de forma aleatória e discreta, no anteparo detector.

No que pese a chegada discreta de quantum de energia, é importante perceber (ver Fig. 1) que, ao final do experimento, o “fenômeno” será compatível com um quadro mental ondulatório, pois estão sendo observadas franjas de interferência (isto ocorre sempre que as duas fendas ficam abertas e não se pode inferir por qual fenda o elétron passou). Estamos diante, portanto, de propriedades ondulatórias associadas à matéria.

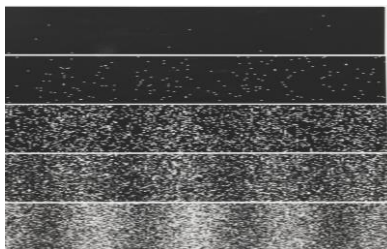


Figura 1. Acúmulo de elétrons em um experimento de interferência, usando a montagem do biprisma eletrônico. Adaptado de TONOMURA et al., 1989, p. 120.

Um ponto crucial que merece toda atenção é que nossa explicação acerca da dualidade ainda está incompleta. Metaforizando, podemos dizer que esta descrição ondulatória é “apenas uma face da moeda”. Para observar um fenômeno corpuscular, com os mesmos objetos quânticos, no caso elétrons, é necessário modificar as condições de observação. Isto implica fazer um outro experimento, no caso, que permita inferir trajetória, ou seja, saber por qual fenda cada elétron passou, por exemplo mediante a utilização de luz (FEYNMAN et al., 2008, p. 1-7). Este seria, de acordo com a metáfora utilizada, “o outro lado da moeda”. É essencial que se perceba que, mesmo neste novo experimento, não se pode atribuir uma posição bem definida ao elétron antes de ser detectado em uma das fendas. O ato de localizá-lo em uma fenda, e portanto, de poder inferir trajetórias passadas (o que Bohr chamou de “retrodição”), é o que torna o fenômeno corpuscular. Neste ponto é importante atentarmos para a fala de Bohr:

De fato, nossa descrição usual de fenômenos físicos é baseada inteiramente na ideia de que os fenômenos envolvidos podem ser observados sem que se provoque um distúrbio apreciável sobre eles. [...] Agora, o postulado quântico implica que qualquer observação de fenômenos atômicos envolverá

uma interação com o agente da observação que não deve ser desprezada. Assim, uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes da observação. (BOHR, 2000, p. 136)

A distribuição de probabilidade de detecção dos elétrons em função da posição, neste segundo experimento (fenômeno corpuscular), é alterado em relação ao primeiro (fenômeno ondulatório). Note-se ainda, para evitar confusão, que a detecção da chegada de cada elétron (quantum de energia) é sempre pontual, devido ao postulado quântico, seja no fenômeno ondulatório ou corpuscular. Para Bohr, apesar da inadequação de representar os elétrons com conceitos clássicos excludentes, não poderemos prescindir da linguagem clássica de “onda” e “partícula”, para comunicar experimentos distintos, quer seja para a matéria ou para radiação eletromagnética. Vejamos:

Esse ponto é de grande importância lógica, uma vez que somente a circunstância de nos ser apresentada uma escolha entre traçar a trajetória de uma partícula *ou* observar os efeitos de interferência permite que escapemos da necessidade paradoxal de concluir que o comportamento de um elétron ou de um fóton deve depender da presença de uma fenda no diafragma através da qual se possa provar que ele não passa. Lidamos aqui com um típico exemplo de como os fenômenos complementares aparecem em arranjos experimentais mutuamente excludentes [...] (BOHR, 1995, p. 59)

4. O princípio de incerteza

O terceiro tipo de complementaridade é o princípio da incerteza. Este expressa a impossibilidade de medição simultânea de posição e momento com precisão arbitrária: “[...] quanto mais precisamente se determinar a posição [de um elétron], menos precisamente se conhece o momento, e inversamente” (HEISENBERG, 1976, p. 64). Este enunciado original, de 1927, parece sugerir que os valores de posição e momento linear podem existir simultaneamente, mas apenas não poderiam ser conhecidos. Para evitar esta inferência, uma maneira de enunciar o princípio, dentro de uma abordagem antirrealista, seria a seguinte

O Princípio de Incerteza Instrumentalista afirma que se o observável S_x for medido e um valor bem definido for obtido, então não se pode prever com certeza o resultado de uma medição do observável incompatível S_z . (GODOY & PESSOA, 2020, p. 388)

O princípio de incerteza é considerado por vários autores como uma expressão do princípio de complementaridade, como escreveu Wolfgang Pauli originalmente em 1933:

A influência do aparelho para medir o momento (posição) do sistema é tal que, dentro dos limites dados pelas relações de incerteza, a possibilidade de usar o conhecimento de uma posição (momento) anterior para a predição dos resultados de medições posteriores de posição (momento) é perdida. Por conta disso, se o uso de *um* conceito clássico exclui aquele de *outro*, chamamos aos dois conceitos (por exemplo, as coordenadas de posição e momento de uma partícula) de *complementares* (um em relação ao outro), seguindo Bohr. Poderíamos chamar a moderna teoria quântica de “Teoria da Complementaridade”, por analogia com a terminologia “Teoria da Relatividade”. (PAULI, 1980, p. 7)

Relações de incerteza específicas se aplicam a quaisquer pares de observáveis descritos por operadores que não comutam, a exemplo das componentes de spin de um átomo de prata. A expressão matemática, envolvendo a constante de Planck $h = 2\pi\hbar$, é que posição e momento obedecem a seguinte relação de comutação: $[x, p_x] = xp_x - p_x x = i\hbar$. Desta forma, o fato de a constante de Planck ser muito pequena (porém diferente de zero) expressa uma limitação de natureza teórica acerca das medidas que são possíveis ou não de se fazer num dado experimento, algo que não pode ser melhorado, por uma questão de princípio, com o aperfeiçoamento tecnológico e nos impõe, portanto, um limite absoluto daquilo que podemos ou não conhecer. Trata-se de uma constante fundamental da física, de valor $h = 6,67 \cdot 10^{-31}$ J·s. Isso nos permite perceber ainda que, enquanto na Mecânica Clássica o processo de medida não altera apreciavelmente o estado de uma partícula, na Mecânica Quântica em geral altera de maneira apreciável (exceto quando o sistema é preparado num autoestado do observável sendo medido). Estamos já em condições de compreender e apreciar, de maneira qualitativa, que o processo de medida, a constante de Planck, o princípio da incerteza e a dualidade onda partícula estão interligados mediante uma linguagem matemática, que nos diz muito, com extraordinária precisão, sobre os experimentos que podemos realizar, mas que nada nos revela sobre o que é a natureza por trás das medições, no sentido ontológico, ao menos na perspectiva de Bohr. Vejamos, então, o seu ponto de vista sobre o aspecto puramente epistêmico, antirrealista e objetivo, da Mecânica Quântica:

Esta descrição usa um formalismo matemático no qual as variáveis das teorias físicas clássicas são substituídas por símbolos sujeitos a um algoritmo não comutativo envolvendo a constante de Planck. Devido ao próprio caráter de tais abstrações matemáticas, o formalismo não permite interpretações intuitivas sob as formas habituais: ele tem por fim único estabelecer relações entre observações obtidas em condições experimentais bem definidas. (BOHR, 1995, p. 90-91; tradução segundo a versão de VIANNA, 1986, p. 17)

Sobre a constante de Planck e a representação clássica, Bohr declarou em 1929:

Quanto mais claramente percebemos que é impossível formular o conteúdo da teoria quântica com a ajuda de um único tipo de representação clássica, mais admiramos a feliz intuição de Planck ao cunhar o termo ‘quantum de ação’, que de modo tão direto indica a insuficiência do princípio de mínima ação, princípio [...] simboliza, por assim dizer, a peculiar relação de simetria recíproca que se dá entre a descrição espaço-temporal e as leis de conservação da energia e da quantidade de movimento [...] (BOHR, 1961, p. 94; tradução de FREIRE, 1999, p. 22)

Vejamos o que Bohr denomina de “representação clássica”, revisitando minimamente alguns dos pilares das teorias clássicas. O estado de uma partícula é dado pela posição e momento. A evolução desse estado, por sua vez, é governada pela segunda lei de Newton, enquanto que a dinâmica quântica (não relativística) é representada pela equação de Schrödinger. Uma vez fixadas as condições iniciais do problema clássico obtemos o estado futuro ou passado em qualquer instante, no dizer de Laplace em 1814: nisso consiste a doutrina determinística (LAPLACE, 2010, p. 42-43). Deste arcabouço teórico se deduz, por exemplo a equação de onda de uma corda tensa e a propagação contínua de energia. O Eletromagnetismo Clássico, por sua vez, através das equações de Maxwell, nos leva à equação de onda que prevê que cargas elétricas irradiam. Ora, onda e partícula, neste contexto clássico, possuem propriedades bem definidas e possuem uma ontologia associada. Em outras palavras, a Física Clássica lida com partículas se movendo continuamente em trajetórias no espaço, e ondas se propagando continuamente ocupando regiões extensas no espaço. Aqui estamos na esfera da intuição sensível. Esta representação pictórica é radicalmente perdida com a mecânica quântica, de acordo com a interpretação de Bohr.

5. Objetividade e antirrealismo em Bohr

Para guiar o nosso raciocínio rumo ao estudo da objetividade e do antirrealismo implícitos no pensamento de Bohr, consideremos cinco questões. Que grandeza física está sendo medida quando o elétron é localizado no anteparo do experimento da dupla fenda? Como se dá a comunicação dos resultados de uma medida? Os conceitos de partícula e onda tem significado ontológico ou epistêmico dentro da interpretação da Complementaridade? Qual o significado genuíno da constante de Planck? O problema da medição se coloca no seio desta interpretação?

O experimento em questão nos dará algumas respostas, mas não todas, uma vez que a mecânica quântica tem uma parte interpretativa indissociável de pressupostos filosóficos e epistemológicos. Por isso devemos refletir também sobre questões que estão para além do experimento.

A grandeza medida (observável) é a posição do elétron. Já as curvas de probabilidade de detecção desses objetos quânticos em função desta posição medida são distintas nos dois experimentos (com detector na fenda e sem detector na fenda). É preciso ter em conta, contudo, que, diferentemente da Física Clássica, que lida com uma ontologia realista, a teoria quântica, segundo interpretações antirrealistas, é “incompatível com a proposição segundo a qual ‘medições’ são processos por meio dos quais descobriremos alguma propriedade desconhecida, embora preexistente da realidade” (PERES, 1984, p. 644). Isto significa dizer que aqueles elétrons, que chegam um por um (ver Fig. 1), não possuem posições bem definidas antes da medida. “Nós mesmos produzimos os resultados da medição” (JORDAN, 1934, citado por PESSOA, 2003, p. 54). A posição de Bohr é que não parte da ciência conjecturar sobre aquilo que não é passível de observação. Nisso consiste o seu antirrealismo.

Mas se a medição não é a descoberta de uma realidade preexistente, então o que é uma medição? Tal como repetidamente enfatizado por Bohr, ela é essencialmente um processo macroscópico, o resultado do qual é descrito numa linguagem clássica. Nunca observamos diretamente o spin de um único elétron, nem a polarização de um único fóton (PERES, 1984, p. 644). Como escreveu Bohr em 1955, uma observação “baseia-se em registros obtidos por meio de dispositivos de amplificação adequados e de funcionamento irreversível” (BOHR, 1995, p. 93).

Em 1949, Bohr escreveu sobre o significado da linguagem clássica em Mecânica Quântica:

[...] por mais que os fenômenos transcendam o âmbito da explicação física clássica, a descrição de todos os dados deve ser expressa em termos clássicos. O argumento é que, com a palavra “experimento”, referimo-nos a uma situação em que podemos dizer aos outros o que fizemos e o que aprendemos, e que, portanto, a explicação do arranjo experimental e dos resultados das observações deve ser expressa numa linguagem inambígua, com a aplicação adequada da terminologia da física clássica. (BOHR, 1995, p. 50-51)

Poderíamos conjecturar se este problema epistêmico não seria resolvido com uma nova linguagem. Sobre este assunto, Heisenberg, que aderiu à interpretação de Bohr, revelou um entendimento próprio da escola de Copenhague, quando declarou em 1958:

Os conceitos da física clássica constituem, por certo, um refinamento dos conceitos da vida quotidiana e são parte da linguagem que propicia a base da ciência natural toda. Nossa real situação na ciência é tal que nós usamos *de fato* os conceitos clássicos para descrever as experiências e isso apresentou-se como um desafio à teoria quântica, quer dizer, se ela é realmente capaz de exibir uma interpretação teórica dessas experiências com base naqueles conceitos. Não adianta discutir-se o que poderia ser feito se fôssemos seres diferentes dos humanos que somos. Neste ponto, temos que compreender que, como disse von Weizsäcker, a “Natureza precedeu o homem mas o homem precedeu a ciência natural”. A primeira parte da citação justifica a física clássica, no seu ideal de objetividade completa. A segunda, diz-nos que não podemos escapar ao paradoxo da teoria quântica, vale dizer, à necessidade de usar conceitos clássicos. (HEISENBERG, 1987, p. 47)

Convém salientar que a interpretação da complementaridade nega o realismo epistemológico (se não negasse, a teoria quântica seria aplicável à realidade não observável), mas admite plenamente o realismo ontológico (PESSOA, 2001, seção 7).

Cabe ainda destacar a distinção epistêmica que Kauark-Leite estabelece entre o estado descrito pela equação de Schrödinger daquele decorrente do estado obtido imediatamente após a medida. A autora traz à tona elementos kantianos que enriquecem a compreensão implicadas nesta distinção, quando declara:

Para caracterizar a ausência de causalidade nos processos de medida efetuadas sobre um sistema quântico, von Neumann [...] se serve da expressão *transformação acausal* para relacionar dois estados que têm naturezas epistêmicas absolutamente distintas: um estado que não está ligado a nenhuma percepção com um outro que se apresenta na percepção quando uma medida é efetuada. O primeiro é descrito por uma superposição de estados dinâmicos do sistema, que não pode ser dado

a nenhuma intuição possível. Como na experiência de pensamento do gato de Schrödinger onde as duas propriedades, estar vivo e morto, se encontram em um estado de superposição. O segundo estado do sistema, depois da medida, se reduz a uma das possibilidades, que, no exemplo de Schrödinger, corresponde à situação onde o gato se encontra ou vivo ou morto. Diferente do primeiro, esse último estado é dado na intuição sensível. Von Neumann afirma que a função de onda, que antes da medida era descrita por uma superposição estatística de dois estados antagônicos possíveis, colapsa para um valor bem determinado quando uma medida é efetuada sobre o sistema quântico. A natureza desse processo é por isso não-causal. (KAUARK-LEITE, 2013, p. 70-71)

A autora salienta que Bohr não era “positivista”, como mencionado em Pessoa (2003, p. 97-98), mas aproximava-se de uma posição kantiana. Tal crítica foi aceita pelo filósofo paulista, como podemos ver em PESSOA (2010, p. 284). De qualquer maneira, defendemos que Bohr era um antirrealista, o que é consistente com o kantismo (e também com o positivismo).

6. Significado epistêmico do vetor de estado

De acordo com a interpretação probabilística de Max Born, incorporada à epistemologia de Bohr, o vetor de estado, que contém todas as informações do sistema, em termos de amplitudes de probabilidade para o resultado da medição de cada valor do observável sendo medido, tem um significado puramente epistêmico. O que isso significa? Que o vetor de estado comunica o conhecimento que temos acerca de um procedimento experimental, mas não é uma grandeza física mensurável, não é um observável, não devendo, pois, ser interpretado de uma forma realista (CARVALHO NETO, 2016). “Os símbolos matemáticos com que descrevemos essas situações observacionais representam possibilidades, e não fatos”, afirmou Heisenberg (1996, p. 145), referindo-se à novidade da interpretação probabilística da nova teoria.

Para concluir, é preciso ter em conta que a teoria quântica gerou o problema da medição, expressão utilizada na literatura especializada, que surge da oposição entre uma evolução determinista regida pela equação de Schrödinger e a evolução indeterminista descrita pelo postulado da projeção. A questão colocada é como, durante uma medição, uma superposição quântica pode ser transformada em estados que se comportam classicamente, isto é, não se superpõem (PESSOA, 1992; PESSOA, 2003, p. 57). O problema da medição, contudo, não se coloca no seio da interpretação da complementaridade, pois está embutido na “descontinuidade

essencial” associada ao postulado quântico de Planck, assumido por Bohr como um postulado, não requerendo, portanto, uma explicação.

Mesmo assim, na década de 1950, a ideia de que toda medição envolve um processo irreversível da amplificação foi aceita por Bohr e seu discípulo León Rosenfeld, como vimos em citação acima, servindo como solução para o problema da medição (para detalhes desse “programa de amplificação termodinâmica”, ver PESSOA, 1992).

É importante, para finalizar, fazer uma defesa de natureza pedagógica e epistemológica, de que os conceitos-chaves da Mecânica Quântica aqui abordados, e a interpretação subjacente adotada, não devem ser reduzidos a “peças isoladas de um quebra-cabeça”. Assim, por exemplo, é importante que se sublinhe que a Dualidade Onda-Partícula e o Princípio da Incerteza são expressões do Princípio da Complementaridade. Não é de se estranhar, portanto, que a medição da posição do elétron (localizando-o numa determinada fenda) implica “borrar” o padrão de interferência, revelando, portanto, uma conexão “íntima” entre a Dualidade e a Incerteza, uma vez que são expressões de um princípio mais geral: o Princípio de Complementaridade. Note-se ainda que, como as relações de incerteza proíbem uma medição simultânea de posição e momento, o vetor de estado não pode mais ser descrito em termos de posição e momento. O vetor de estado quântico expressa um procedimento experimental e tem um significado epistêmico. O valor diminuto (porém diferente de zero) da constante de Planck, por sua vez, está em plena sintonia com aquela incompatibilidade e fixa um limite absoluto àquilo que podemos medir. Assim, no que pese a extraordinária precisão com que permite prever e comunicar resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido, a teoria não se ocupa de responder sobre o que é o objeto quântico, no sentido ontológico, conferindo-lhe assim seu aspecto antirrealista e, ao mesmo tempo, objetivo. (CARVALHO NETO, 2016). Trata-se de uma peculiaridade da ciência do nosso tempo...

Agradecimentos

Agradeço a Osvaldo Pessoa, pela leitura crítica e valiosas sugestões contempladas, a Patrícia Kauark, cujos trabalhos me foram muito úteis na percepção da influência de Kant no pensamento de Bohr, e a Eduardo Simões, pela gentileza e incentivo acadêmico.

Referências Bibliográficas

- BOHR, N. O postulado quântico e o recente desenvolvimento da física atômica. In: Pessoa Jr., O. (org.). *Fundamentos da Física*, v. 1 (Simpósio David Bohm). São Paulo: Livraria da Física, p. 135-59, 2000. Original: *Nature*, v. 121, p. 580-590, 1928.
- BOHR, N. *Atomic theory and the description of nature: Four essays with an introductory survey*. Cambridge: Cambridge University Press, 1961.
- BOHR, N. A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa? Trad. C.W. Abramo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 1, v. 2, p. 97-106, 1981.
- BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano*. Trad. V. Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- CARVALHO NETO, R.A. *Internalização do significado da teoria quântica do processo de medida de acordo com a interpretação da complementaridade*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Salvador / Feira de Santana, 2016.
- FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. *Lições de Física de Feynman: edição definitiva*. Vol. III. Trad. A. J. Roque da Silva & S.R.A. Canuto. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- FREIRE Jr., O. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Coleção CLE 27. Campinas: Centro de Lógica e Epistemologia, 1999.
- FREIRE Jr., O.; CARVALHO NETO, R.A. *O universo dos quanta*. São Paulo: FTD, 1997.
- GODOY, W.; PESSOA Jr., O. Juntando EPR e Bell. In: O'LEARY, M.; FEDERICO, L. & ARIZA, Y. (orgs.). *Filosofia e Historia de la Ciencia del Cono Sur*. São Carlos, SP; Buenos Aires: AFHIC, pp. 385-96, 2020.
- HEISENBERG, W. *Física e filosofia*. Trad. J. L. Ferreira. Brasília: Editora UnB, 1987.
- HEISENBERG, W. *A parte e o todo*. Trad. V. Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- JAMMER, M. *The philosophy of quantum mechanics*. New York: Wiley, 1974.
- KAUARK-LEITE, P. Redefinindo a curvatura do arco: aspectos transcendentais da racionalidade quântica. *Analytica*, v. 17, p. 59-78, 2013.
- KAUARK-LEITE, P. *Niels Bohr e a interpretação kantiana da mecânica quântica*. Palestra proferida para o Grupo de Pesquisa em Lógica, Linguagem e Ciência, Universidade Federal do Tocantins, por via remota, em 7 de abril de 2022. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=IdaNv1jqoU0>
- LAPLACE, P.-S. (2010). *Ensaio filosófico sobre as probabilidades*. Trad. P.L. Santana. Rio de Janeiro: Contraponto/Ed. PUC-Rio.
- MACKINNON, E. Bohr on the foundations of quantum theory. In: FRENCH, A.P.; KENNEDY, P.J. (orgs.). *Niels Bohr: a centenary volume*. Cambridge: Harvard University Press, p. 101-120, 1985.

- PAULI, W. *General principles of quantum mechanics*. Trad. A. Achuthan & K. Venkatesan. Berlin: Springer, 1980.
- PERES, A. What is a state vector? *American Journal of Physics*, v. 52, p. 644-650, 1984.
- PESSOA Jr., O. O problema da medição em mecânica quântica: um exame atualizado. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, v. 2, p. 41-81, 1992.
- PESSOA Jr., O. O sujeito na física quântica. In: OLIVEIRA, E.C. (org.). *Epistemologia, lógica e filosofia da linguagem: ensaios de filosofia contemporânea*. Feira de Santana: Núcleo de Estudos Filosóficos (UEFS), 2001, p. 157-96.
- PESSOA Jr., O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- PESSOA Jr., O. O fenômeno cultural do misticismo quântico. In: FREIRE JR., O.; PESSOA JR., O.; BROMBERG, J.L. (orgs.). *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*, Eduepb, Campina Grande: Edu-epb; São Paulo: Livraria da Física, p. 279-300, 2010.
- TONOMURA, A.; ENDO, J.; MATSUDA, T.; KAWASAKI, T.; EZAWA, H. Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, v. 57, p. 117-120, 1989.
- VIANNA, J.D.M. Sobre algumas questões da teoria quântica. In: JAUCH, J.M. *São os quanta reais?* Trad. J.D.M. Vianna. São Paulo: Nova Stella / Edusp, p. 15-19.

Recebido em: 01/06/2022

Aprovado em: 22/08/2022

Rodolfo Alves de Carvalho Neto

Doutor pelo Programa de Pós Graduação de Ensino, Filosofia e História das Ciências, da Universidade Federal da Bahia, UFBA. Investigou como os alunos da graduação da UFBA (2014-2) internalizaram a teoria quântica do processo de medida de acordo com a interpretação da complementaridade. Sua tese recebeu menção honrosa 2016. É Engenheiro Civil e Licenciado em Física pela UFBA. Lecionou na UFBA. É um dos autores do livro o Universo dos Quanta, editado pela FTD (1997). Compositor, arranjador e violonista. Na sua produção artística consta o livro Amores da Minha Vida, onde reúne histórias de vida. Tem canções em parceria com Murilo Miranda gravadas no CD intitulado Transcendência da Bossa. Foi um dos idealizadores do Show 60 anos de Bossa Nova, ocorrido em outubro de 2019, onde tocou e cantou com personagens renomados da Bossa Nova: Roberto Menescal, Quarteto do Rio (Ex Os Cariocas) e Wanda Sá. É professor Adjunto A de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) em regime de dedicação exclusiva (DE), no Departamento de Física (DFIS), atuando na área de pesquisa em Ensino de Física, particularmente, no Ensino de Física Quântica.