



Niels Bohr e as lições filosóficas da Teoria Quântica: Princípios de Correspondência e Complementaridade

Niels Bohr and the philosophical lessons of Quantum Theory: Principles of Correspondence and

DOI: 10.20873/rpv7n2-50

Rafael Velloso

Orcid ID: 0000-0002-2601-6495
Email: velloso.rafa@gmail.com

Resumo

Com base na produção bibliográfica de Niels Bohr, entre os anos de 1913 e 1931, o presente artigo busca reconstruir o processo de elaboração das duas principais ideias do físico dinamarquês: os princípios de correspondência e complementaridade. Através desta reconstrução, busca-se analisar as possíveis motivações (a nível físico, filosófico e em prol de uma agenda de pesquisa) que guiaram Bohr neste período de elaboração da correspondência e complementaridade. Ao analisar este processo, é possível identificar que ambos os princípios estão interligados, de maneira que, para a compreensão mais ampla do pensamento bohriano, é preciso considerar ambos conceitos enquanto agentes praticamente indissociáveis. Outro aspecto discutido é quais lições epistemológicas e ontológicas Bohr nos apresenta ao propor a correspondência e complementaridade.

Palavras-chave

Teoria Quântica. Bohr. Correspondência. Complementaridade. Epistemologia. Ontologia.

Abstract

Based on the bibliographic production of Niels Bohr between the years 1913 and 1931, the present article aims to reconstruct the process of elaboration of the two main ideas of the Danish physicist: the principles of Correspondence and Complementarity. Through this reconstruction, it is sought to analyze the possible motivations (at the physical, philosophical level and in favor of a research agenda) that guided Bohr in this period of elaboration of correspondence and complementarity. By analyzing this process, it is possible to identify that both principles are interconnected, so that, for a broader understanding of Bohrian thought, it is necessary to consider both concepts as practically inseparable agents. Another aspect discussed is what epistemological and ontological lessons Bohr presents us with when proposing Correspondence and Complementarity.

Keywords

Quantum Theory. Bohr. Correspondence. Complementarity. Epistemology. Ontology.

Introdução

As controvérsias que envolvem a teoria quântica, ou melhor, o chamado *Kopenhagener Geist*¹ (comumente denominado por Interpretação de Copenhague), após quase 100 anos de sua fundação continuam a produzir debates² físicos e filosóficos sobre seus fundamentos e suas consequências ontológicas e epistemológicas (HOWARD, 1994; BELLER, 1999; BITBOL, 1996). A década de 1920, período que condensa momentos importantes na discussão e elaboração da teoria quântica, foi permeada por debates e divergências entre nomes como: Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Arnold Sommerfeld, Albert Einstein, Max Born, Wolfgang Pauli, Paul Dirac, Léon Rosenfeld, Pascual Jordan, entre outros (BALSAS; VIDEIRA, 2013; BELLER, 1999). Alguns destes pontos de divergência, é o papel da descrição dos fenômenos físicos e a ressignificação de conceitos clássicos (capitaneada principalmente por Bohr) (REGT, 1997; 2001; CHEVALLEY, 1994b; 1996; 1999; FEYERABEND, 1961. HOWARD, 1994). Na tentativa de construir uma teoria sobre o regime quântico - totalmente distinto das impressões sensoriais imediatas (*unmittelbaren Sinneseindrücken*) usuais (Cf. BOHR, 1931, p. 60) - algumas modificações na nossa forma de conceber determinados conceitos seriam necessárias. Com estas remodelações, elaborou-se o que o físico dinamarquês denominou como “*natural generalisation [sic] of the classical mode of description*” (BOHR, 1928a, p. 581). Neste sentido, o presente artigo propõe-se a: apresentar o processo de construção dos princípios de correspondência e da

¹ Até os anos 1950 não havia menção de uma “Interpretação de Copenhague”. O primeiro registro é creditado ao físico soviético Dmitrii Ivanovich Blokhintsev, que em 1953 publicou um artigo com o título “*Kritik der philosophischen Anschauungen der sogenannten Kopenhagener Schule in der Physik*” (Crítica às visões filosóficas em física da chamada Escola de Copenhague) (CHEVALLEY, 1999). Dois anos depois, em 1955, o termo “Interpretação de Copenhague” já é encontrado em escritos de Heisenberg, onde uma conotação de unidade da teoria passa a ser empregada e defendida, à contragosto de Bohr (CAMILLERI, 2009).

² As teorias e resultados experimentais que vinham sendo elaborados no decorrer do desenvolvimento da mecânica quântica também despertou interesse de filósofos como Gaston Bachelard, Ernst Cassirer, Karl Popper, Susan Stebbing, Hans Reichenbach, Moritz Schlick, entre outros, que acompanhavam e discutiam as consequências que a então nova área da física produzia no conhecimento (FOLSE, 1985; CUSHING, 1994; CHEVALLEY, 1996).

complementaridade; discutir a relação existente entre estes dois conceitos; analisar as possíveis motivações que guiaram as atitudes de Bohr, tendo como base algumas de suas publicações entre 1913 e 1931.

Correspondência: uma base comum para a pesquisa em quântica

Publicado em 1913, no artigo *On the constitution of atoms and molecules* Bohr externa seu interesse e, em certa medida, dificuldade em compreender os recentes estudos sobre a estrutura atômica. Com a proposição da existência de um núcleo atômico positivo, feita por Ernest Rutherford em 1911, Bohr argumenta que, apesar de possibilitar boas explicações para resultados experimentais, algumas dificuldades emergem a respeito da estabilidade atômica (Cf. BOHR, 1913, p. 2). Desta maneira, o físico dinamarquês afirma que:

O resultado da discussão destas questões parece ser um reconhecimento geral da inadequação da eletrodinâmica clássica ao descrever o comportamento de sistemas de dimensão atômica. Qualquer que seja a alteração nas leis de movimento dos elétrons, parece necessário introduzir nas leis em questão uma quantidade externa à eletrodinâmica clássica, ou seja, a constante de Planck, ou como muitas vezes é chamado o quantum elementar de ação. (BOHR, 1913, p. 2, tradução do autor)³

Há nesta citação premissas que são fundamentais no pensamento bohriano: a insuficiência da eletrodinâmica clássica ao descrever fenômenos atômicos; a teoria de Max Planck como condição necessária para compreensão do regime quântico. A fim de respaldar estas afirmações, Bohr elenca uma série de exemplos nos quais tanto a limitação da eletrodinâmica clássica, quanto a necessidade da constante de Planck poderiam ser verificados, como: os estudos sobre o efeito fotoelétrico conduzidos por Einstein, que foram aplicados por Sommerfeld; as elaborações do físico austríaco Arthur Haas, que forneceu uma explicação para o significado do valor da constante de Planck, com base no modelo atômico de J. J. Thomson; J. W. Nicholson e suas análises das linhas espectrais (Cf. BOHR, 1913, p. 6). Ou seja, apesar das aparentes

³ Original em inglês: *The result of the discussion of these questions seems to be a general acknowledgment of the inadequacy of the classical electrodynamics in describing the behavior of systems of atomic size. Whatever the alteration in the laws of motion of the electrons may be, it seems necessary to introduce in the laws in question a quantity foreign to the classical electrodynamics, i. e. Planck's constant, or as it often is called the elementary quantum of action.*

contradições que emergiam destes estudos (como a relação entre onda e partícula), para o físico dinamarquês estes eram indicadores tanto da validade da teoria de Planck, quanto da necessidade de uma remodelação da eletrodinâmica clássica. Logo, ele propõe as seguintes suposições:

(1) Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido com auxílio da mecânica ordinária, enquanto a transição dos sistemas entre diferentes estados estacionários não pode ser tratada com base nela.

(2) Que este último processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida é a dada pela teoria de Planck. (BOHR, 1913, p. 7, tradução do autor)⁴

Como o próprio físico ressalta, remodelações em conteúdos considerados canônicos (como uma descrição espaço-temporalmente contínua) não costumam ser bem recebidos pela comunidade, no entanto, “a primeira suposição fala por si mesma; pois é sabido que a mecânica ordinária não pode ter uma validade absoluta” (BOHR, 1913, p. 7, tradução do autor)⁵. Apesar da inadequação entre sua proposta e a eletrodinâmica clássica, através de uma generalização⁶ seria possível interpretar os fenômenos atômicos. Além disto, se considerarmos que a estrutura atômica é constituída por um núcleo positivo, orbitado por um anel de elétrons em estado estacionário, é possível utilizar as ideias ordinárias da mecânica clássica sem maiores problemas (Cf. BOHR, 1913, p. 23). Ou seja, ao mesmo tempo que Bohr advoga pela limitação das ideias clássicas na compreensão dos fenômenos quânticos, estas parecem ser necessárias e capazes de fornecer boas explicações, a partir de determinadas condições.

Argumentos similares são reproduzidos em artigo publicado em 1915, *On the Quantum theory of radiation and the structure of the atom*, onde é possível perceber que, apesar de propor

⁴ Original em inglês: (1) *That the dynamical equilibrium of the systems in the stationary states can be discussed by help of the ordinary mechanics, while the passing of the systems between different stationary states cannot be treated on that basis.* (2) *That the latter process is followed by the emission of a homogeneous radiation, for which the relation between the frequency and the amount of energy emitted is the one given by Planck's theory.*

⁵ Original em inglês: *The first assumption seems to present itself; for it is known that the ordinary mechanics cannot have an absolute validity.*

⁶ Generalização é um termo importante no pensamento bohriano, que será discutido em detalhes no decorrer do artigo.

uma estrutura atômica como uma tentativa de aproximar as leis da eletrodinâmica clássica e a teoria de Planck, a teoria quântica possuía uma série de problemas, como o equilíbrio do sistema atômico em estado estacionário, que “[...] é regida pelas leis ordinárias da mecânica, enquanto essas leis não se aplicam à transição de um estado para outro” (BOHR, 1915, p. 396, tradução do autor)⁷.

Em 1918 é publicado a primeira parte⁸ do artigo “*On The Quantum Theory of Line Spectra. Part I: On the general theory*”, no qual já na introdução afirma-se que, apesar dos progressos na área, questões de natureza fundamental continuam sem solução. De acordo com Bohr, estas dificuldades estão:

[...] intimamente ligadas à renúncia radical das ideias ordinárias da mecânica e eletrodinâmica envolvidas nos principais princípios da teoria quântica, e com o fato de não ter sido possível até agora substituir essas ideias por outras que formassem uma estrutura igualmente consistente e desenvolvida. (BOHR, 1918, p. 70, tradução do autor)⁹

Logo, “*On The Quantum Theory of Line Spectra*” tem como objetivo principal “lançar alguma luz sobre as proeminentes dificuldades, ao tentar traçar a analogia, o mais próximo possível, entre a teoria quântica e a teoria ordinária da radiação” (BOHR, 1918, p. 70, tradução do autor)¹⁰. Neste sentido, Bohr fundamenta suas ideias para a teoria quântica nas seguintes posições:

I. Que um sistema atômico pode, e somente pode existir permanentemente em uma determinada série de estados correspondentes a uma série descontínua de valores para sua energia e que, conseqüentemente, qualquer mudança na energia do sistema, incluindo a emissão e absorção de radiação

⁷ Original em inglês: *is governed by the ordinary laws of mechanics, while these laws do not hold for the transition from one state to another.*

⁸ A primeira parte deste extenso artigo foi escrito em 1917 e publicado em 27 de abril de 1918 e a segunda parte, “*Part II: On the hydrogen spectrum*”, publicado 30 de dezembro deste mesmo ano. A terceira parte, “*Part III: On the elements of higher atomic number*”, teve sua publicação atrasada, devido o rápido desenvolvimento da área, e foi impresso somente em novembro de 1922. A quarta parte, que é um apêndice, funciona como uma espécie de síntese das três partes anteriores. Posteriormente, estes textos ficaram conhecido como “*The Correspondence Principle*” (Cf. ROSENFELD e NIELSEN, 1976, p. 4).

⁹ Original em inglês: *[...] intimately connected with the radical departure from the ordinary ideas of mechanics and electrodynamics involved in the main principles of the quantum theory, and with the fact that it has not been possible hitherto to replace these ideas by others forming an equally consistent and developed structure.*

¹⁰ Original em inglês: *to throw some light on the outstanding difficulties by trying to trace the analogy between the quantum theory and the ordinary theory of radiation as closely as possible.*

eletromagnética, deve ocorrer por uma transição completa entre dois desses estados. Estes estados serão denominados como os "estados estacionários" do sistema.

II. Que a radiação absorvida ou emitida durante uma transição entre dois estados estacionários é "não-frequêntica" e possui uma frequência ν , dada pela relação

$$E' - E'' = h \nu$$

Onde h é a constante de Planck e onde E' e E'' são os valores da energia nos dois estados em consideração. (BOHR, 1918, p. 71, tradução do autor)¹¹

Pode-se dizer que nestas suposições estão condensadas ideias caras para Bohr ao longo dos anos posteriores e que demonstram as contradições existentes entre a mecânica e eletrodinâmica clássica e a teoria quântica, dentre elas, a questão da descontinuidade dos fenômenos. Enquanto no regime clássico os fenômenos existem de maneira contínua no espaço-tempo, no regime quântico os sistemas atômicos existem apenas em determinados níveis energéticos. Desta maneira, as transições entre estes possuem características extra-mecânicas (Cf. BOHR, 1918, p. 42) (que não podem ser explicadas pelas leis da mecânica clássica ordinária), incompreensíveis pela eletrodinâmica clássica ordinária, implicando que "as leis ordinárias da eletrodinâmica não podem ser aplicadas a esses estados sem uma alteração radical" (BOHR, 1918, p. 72, tradução do autor)¹². No entanto, logo em seguida Bohr apresenta a outra face deste problema¹³, ao argumentar que por meio da mecânica e eletrodinâmica ordinária é possível

¹¹ Original em inglês: *I. That an atomic system can, and can only, exist permanently in a certain series of states corresponding to a discontinuous series of values for its energy, and that consequently any change of the energy system, including emission and absorption of electromagnetic radiation, must take place by a complete transition between two such states. These states will be denoted as the "stationary states" of the system. II. That the radiation absorbed or emitted during a transition between two stationary states is "unifrequent" and possesses a frequency ν , give by the relation $E' - E'' = h \nu$ Where h is Planck's constant and where E' and E'' are the values of the energy in the two states under consideration.*

¹² Original em inglês: *the ordinary laws of the electrodynamics cannot be applied to these states without radical alteration.*

¹³ Em seus escritos, há uma característica estilística na escrita de Bohr que, de certa maneira, traduz seu pensamento. Ao fazer afirmações como a da necessidade de uma alteração radical na eletrodinâmica, é muito comum logo em seguida Bohr argumentar que, mesmo com esta carência, é possível utilizá-la nos estudos dos fenômenos quânticos, a partir de determinadas condições. Esse esforço em lidar com as contradições, sem tentar extingui-las, é uma característica fundamental no pensamento bohriano.

explicar fenômenos de temperatura e radiação, em baixas vibrações (Cf. BOHR, 1918, p. 72). Ao mesmo tempo que a física clássica parece falhar, ela também fornece boas explicações quando aplicada a fenômenos quânticos, sob certas condições. Ou seja, apesar de advogar por uma alteração radical da mecânica e eletrodinâmica clássicas, em hipótese alguma Bohr defendia seu completo abandono, mas, sim, sua “natural generalisation [sic]¹⁴” (Cf. BOHR, 1918, p. 72). A este processo de generalização das ideias clássicas, onde elas não são descartadas, mas modificadas e aplicadas a sistemas atômicos, dentro de determinadas condições, Bohr denominou Princípio de Correspondência. Para fundamentar a correspondência, é empregado o princípio de Boltzmann¹⁵ sobre a relação entre entropia e probabilidade; a reinterpretação de Einstein deste princípio e a suposição do *a priori* probabilístico¹⁶; a lei de deslocamento de Wien¹⁷; a teoria de Planck. De acordo com Bohr, o conjunto dessas ideias seria uma espécie de suporte para a relação $E' - E'' = h\nu$ (como apresentada anteriormente) (Cf. BOHR, 1918, p. 73).

Ao longo das partes II e III, Bohr interpreta os diferentes estudos sobre o regime quântico a partir da correspondência. Dentre os estudos citados, aparecem nomes como Einstein, Sommerfeld, Zeeman, Epstein, Debye, Schwarzschild, Paschen, Planck, Ehrenfest, Wien, Haas, Kramers, Stark, Fowler, Schrödinger, Landé, Heisenberg e até mesmo Boltzmann. Mesmo estes sendo de áreas distintas da física e, alguns casos, apresentando ideias contraditórias entre si (como era muito comum nos estudos envolvendo o comportamento ondulatório e corpuscular

¹⁴ Em seus artigos escritos em inglês e alemão é comum encontrarmos erros ortográficos. Como relatado pelo historiador da ciência Alexei Kojevnikov, Bohr não dominava a escrita das línguas inglesa e alemã, sendo recorrente tanto a presença de pequenos erros ortográficos, quanto uma aparente “falta” de rigidez na tradução de alguns conceitos (KOJEVNIKOV, 2020), que serão indicadas, quando ocorrerem.

¹⁵ O princípio de Boltzmann descreve a relação existente entre entropia e probabilidade, ou seja, dada uma distribuição de certo número de partículas em sistema fechado (que não possui interações externas), qual a probabilidade do sistema se encontrar em determinado estado em função de sua energia e temperatura (EISBERG; RESNICK, 1979; PESSOA JR, 2003). Apesar de levar o nome do físico austríaco, não foi Boltzmann que formalizou matematicamente este princípio. Foi Planck que, em 1900, formalizou este princípio e, em 1905, Einstein denomina esta relação como princípio de Boltzmann (HAUBOLD et al., 2004).

¹⁶ *A priori* probabilístico é um argumento matemático que descreve a possibilidade de uma determinada partícula estar em um determinado estado. Este argumento conecta a desordem do sistema (relacionada a entropia, no princípio de Boltzmann) e probabilidade (CHAKRABARTI; CHAKRABARTY, 2007).

¹⁷ A lei de deslocamento de Wien (ou lei de Wien) relaciona os picos da curva da radiação de corpo negro, para diferentes comprimentos de onda, com a temperatura. Este lei pode ser obtida a partir da equação de Planck (EISBERG; RESNICK, 1979).

dos fenômenos luminosos), Bohr busca “por meio do princípio da correspondência, [...] oferecer uma pista para a compreensão da estabilidade da estrutura atômica em geral” (BOHR, 1918, p. 180, tradução do autor)¹⁸. Não será abordado em detalhes os estudos dos nomes supracitados, mas suas menções nos possibilitam compreender uma atitude (e, em certo sentido, um objetivo) marcante em Bohr: já em 1918 é possível perceber que este buscava não somente explicações, por vias de uma generalização das ideias clássicas, para as aparentes contradições dos fenômenos atômicos, mas também a elaboração de uma ideia que congregasse sob seu escopo, os mais distintos estudos sobre o regime quântico.

Em decorrência de ter sido laureado com o prêmio Nobel em 1922, Bohr realiza uma preleção intitulada *The Structure of the Atom*. No mesmo espírito de outros textos seus, o físico dinamarquês apresenta características aparentemente contraditórias sobre a estrutura atômica, mas que, ao contrário do que se pensa, uma escolha entre elas não é estritamente necessária. Exemplo disto seria a espectroscopia. Se, por um lado, a análise das linhas espectrais possibilitou a observação e descoberta de novos elementos (presentes aqui na Terra e nos mais longínquos cantos do Universo) - processo utilizado principalmente pela química -, por outro lado “com base em nossa imagem¹⁹ da constituição do átomo é, portanto, impossível, desde que nos restringamos às leis mecânicas ordinárias, dar conta da estabilidade atômica característica que é necessária para uma explicação das propriedades dos elementos” (BOHR, 1923, p. 31, tradução do autor)²⁰. Ou seja, uma compreensão destes contrastes não seria possível enquanto a física permanecesse confinada dentro da teoria da eletrodinâmica clássica pois, de acordo com ela, os elétrons em movimento iriam continuamente emitir radiação, o que ocasionaria seu colapso no núcleo atômico. Entretanto, estas dificuldades podem ser evitadas “introduzindo conceitos emprestados da chamada teoria quântica, que marca uma completa ruptura com as

¹⁸ Original em inglês: *by means of the correspondence principle, [...] to offer a clue to the understanding of the stability of atomic structure in general.*

¹⁹ Imagem no caso seria a analogia entre um sistema planetário e a estrutura atômica. Enquanto os átomos não sofrem mudanças permanentes devido a forças externas, o mesmo não se pode afirmar para o caso dos astros (Cf. BOHR, 1923, p. 30-31).

²⁰ Original em inglês: *on the basis of our picture of the constitution of the atom it is thus impossible, so long as we restrict ourselves to the ordinary mechanical laws, to account for the characteristic atomic stability which is required for an explanation of the properties of the elements.*

ideias que até agora têm sido utilizadas para a explicação de fenômenos naturais” (BOHR, 1923, p. 31, tradução do autor)²¹.

Modificações como as propostas, no entanto, não seriam novidades na física. Einstein, por exemplo, formulou a hipótese dos *quanta* de luz como uma possível interpretação do resultado obtido por Planck. Hipótese esta que, ao introduzir descontinuidade na radiação de energia, contradiz a teoria eletromagnética tal como proposta por Maxwell. Isto seria mais um indício de que, somente com os conceitos clássicos, não seria possível compreender propriedades essenciais dos átomos (Cf. BOHR, 1923, p. 32). Apesar dessa defesa por uma remodelação, Bohr resgata seus postulados de 1913 (apresentados anteriormente), como forma de ilustrar que, se considerarmos os sistemas atômicos em estados estacionários, é possível fornecer explicações sobre a constituição atômica, com base na interpretação da mecânica e eletrodinâmica clássica e da teoria de Planck.

Esta conexão entre mecânica clássica, eletrodinâmica e teoria quântica já poderia ser constatada na fórmula de Balmer²², expressa pela relação

$$K = \frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3},$$

onde e e m são, respectivamente, carga e massa do elétron e h a constante de Planck. Ou seja, pela relação entre e , m e h é possível observar como os estudos sobre o espectro do hidrogênio e seu modelo atômico se conectam. Isto significa, a rigor, como onda e partícula se relacionam. Além disto, Bohr também considera que essa conexão se aproxima de um rompimento com as leis da mecânica e eletrodinâmica clássicas, além de indicarem que a teoria quântica é uma espécie de “generalização natural dos conceitos fundamentais da teoria eletrodinâmica clássica” (BOHR, 1923, p. 34, tradução do autor)²³.

²¹ Original em inglês: *by introducing concepts borrowed from the so-called quantum theory, which marks a complete departure from the ideas that have hitherto been used for the explanation of natural phenomena.*

²² A série de Balmer (ou linhas de Balmer) determina o comprimento de onda das linhas espectrais de emissões do átomo de hidrogênio, obtidas empiricamente pelo matemático e físico suíço Johann Jakob Balmer, em 1885 (EISBERG; RESNICK, 1979).

²³ Original em inglês: *natural generalisation [sic] of the fundamental concepts of the classical electrodynamic theory.*

Mesmo com o aparente sucesso ao aproximar a mecânica e eletrodinâmica clássicas às ideias da teoria quântica, em *Atomic Theory and Mechanics*²⁴ Bohr alerta para as dificuldades ainda existentes ao compararmos a base teórica com as leis empíricas (BOHR, 1925). Um dos fatores para essas dificuldades estaria em um ponto que é basal para as teorias clássicas: suas representações²⁵ (*Vorstellungen*) a partir de ideias que exigem a possibilidade de uma variação contínua (Cf. BOHR, 1926, p. 2). Inclusive, esta dificuldade não seria algo percebido somente pelo físico dinamarquês, mas já estava presente nos estudos desenvolvidos por Einstein:

[...] [as] características essenciais da interação entre luz e matéria sugerem que a propagação da luz não se dá através da propagação de ondas, mas por "quanta de luz", que, concentrado em uma pequena região do espaço, contém a energia $h\nu$, onde ν é a frequência da luz. A natureza formal desta afirmação é evidente, pois a definição e medição desta frequência se baseia exclusivamente nas ideias da teoria ondulatória. (BOHR, 1925, p. 846, tradução do autor)²⁶

²⁴ Artigo publicado em dezembro 1925, cujo conteúdo foi apresentado em agosto deste mesmo ano no 6º Congresso Escandinavo de Matemática, ocorrido em Copenhague. Em nota, Bohr comenta que este texto foi bastante influenciado pelo artigo de Heisenberg *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen* (1925). Considerado bastante técnico, do ponto de vista do formalismo matemático, este artigo de Heisenberg forneceu as bases para a mecânica matricial, fundamental para teoria quântica.

²⁵ Este artigo, originalmente em inglês, possui uma versão em alemão publicado em 1926 que, quando cotejadas, possuem diferenças significativas, como é o caso da frase onde esta nota se localiza. No inglês, a frase é "*The more precise formulation of the content of the quantum theory appears, however, to be extremely difficult when it is remembered that all the concepts of previous theories rest on **pictures** which demand the possibility of a continuous variation*" (BOHR, 1925, p. 846, negrito do autor), enquanto que no alemão é "*Die genauere Formulierung des Inhaltes der Quantentheorie scheint aber eine äußerst schwierige Aufgabe, wenn man bedenkt, daß alle Begriffe der bisherigen Theorien auf **Vorstellungen** zurückgehen, die die Möglichkeit von kontinuierlichen Änderungen verlangen*" (BOHR, 1926, p. 2, negrito do autor). Ou seja, enquanto no inglês Bohr argumenta que as dificuldades residem na forma como as imagens (*picture*) da teórica clássica demandam continuidade, no alemão são as representações (*Vorstellungen*). Antes de comentar sobre essa diferença, vale destacar também que *picture* é um termo que Bohr utiliza para palavras distintas no alemão. Por exemplo, *Auffassungen* (concepção) e *Anschaulichkeit* (inteligibilidade, visibilidade) são termos que Bohr traduz como *picture*. A utilização de *Vorstellungen* no alemão, pode ser indicativo de que Bohr reconhece a participação ativa e construtiva dos cientistas, quando se deparam com a necessidade de elaboração de conceitos, modelos, leis etc. De acordo com Chevalley, Bohr não utiliza *Bild/Picture* como *mimesis*, pois "*Bohr appelle "image" une représentation dans l'espace et le temps ordinaires, formée dans l'expérience quotidienne; c'est une intuition empirique au sens kantien, mais elle est clairement munie chez Bohr d'une condition "darwinienne" quant à sa genèse, en un sens proche de celui de l' "image mentale" de Boltzmann*" (CHEVALLEY, 1991, p. 462). Sobre a noção de imagem mental em Boltzmann, cf. Videira, 2006.

²⁶ Original em inglês: [...]*essential features of the interaction between light and matter suggest that the propagation of light does not take place by spreading waves but by "light-quanta", which, concentrated in a small region of space, contain the energy $h\nu$, where ν is the frequency of the light. The formal nature of this statement is evident, because the definition and measurement of this frequency rests exclusively on the ideas of the wave theory.*

Entretanto, mesmo com estes problemas, a teoria quântica (a partir dos postulados anteriormente apresentados) é capaz de fornecer explicações para as propriedades dos elementos químicos e físicos (Cf. BOHR, 1925, p. 847). Ou seja, no domínio dos estudos dos elementos o abismo entre teoria e leis empíricas parece ter sido superado. Neste sentido, o problema geral na teoria quântica não residiria na modificação dos conceitos usuais da mecânica e eletrodinâmica clássicas, mas na falha das imagens (*pictures/Bilder*) espaço-temporais, comumente utilizadas na descrição dos fenômenos naturais (Cf. BOHR, 1925, p. 848). Ainda assim, “tem sido possível construir imagens mecânicas dos estados estacionários que se baseiam na representação²⁷ de átomo nuclear e têm sido essenciais na interpretação das propriedades específicas dos elementos” (BOHR, 1925, p. 848, tradução do autor)²⁸. Ou seja, parece ser mais o caso de Bohr querer destacar que nada indica que as ideias da física clássica possuem validade definitiva, do que uma aderência ou indisposição ao indeterminismo e causalidade, respectivamente.

Por outro lado, características como frequência, revolução ou formato das órbitas dos elétrons, apesar de representadas com base em imagens mecânicas (em estados estacionários), não são passíveis de observação, o que denotaria o caráter simbólico dessas imagens (*pictures/Bilder*) (Cf. BOHR, 1925, p. 848). Aspecto bem exemplificado pelo fato dos elétrons, de acordo com as imagens mecânicas, estarem em movimento, mas não emitirem radiação. No entanto, em um movimento tipicamente bohriano “a ilustração²⁹ dos estados estacionários por imagens mecânicas trouxe à luz uma analogia de longo alcance entre a teoria quântica e a teoria

²⁷ Nesta citação, há uma pequena diferença entre o texto em inglês e em alemão. Enquanto na versão inglesa é utilizado “*which rest on the concept of the nuclear atom*”, no alemão é “*die auf der Vorstellung des Kernatoms beruhen*” (negritos do autor). Ou seja, enquanto na versão inglesa se fala em conceito de átomo nuclear, na alemã fala-se em representação (mesmo termo utilizado como descrito na nota 25).

²⁸ Original em inglês: *it has been possible to construct mechanical pictures of the stationary states which rest on the concept of the nuclear atom and have been essential in interpreting the specific properties of the elements.*

²⁹ Aqui também há uma diferença entre as versões. Enquanto na inglesa o termo usado é *visualization*, na alemã é *Veranschaulichung*, que pode ser traduzido como ilustração. Neste caso, é uma diferença que altera o sentido da frase. Ao usar visualização por imagens mecânicas, passa-se a ideia de que possível, a partir de certas condições, se observar a estrutura atômica. Já o termo ilustração por imagens mecânicas, reforça o caráter simbólico desta representação. Como, geralmente, Bohr é mais conceitualmente rigoroso no alemão, em caso de divergências como esta, será privilegiada a versão neste idioma.

mecânica” (BOHR, 1925, p. 848, tradução do autor)³⁰. Ciente destas dualidades, Bohr externa que, por meio do princípio da correspondência, é possível reinterpretar as ideias das teorias clássicas de maneira adequada³¹ (mesmo com os contrastes entre as duas teorias), o que ele considera como um primeiro passo na implementação de um programa³² baseado no conceito de núcleo atômico (Cf. BOHR, 1926, p. 5).

Ao fim do artigo, Bohr reafirma a importância do trabalho de Heisenberg de 1925, com o qual foi possível superar certas dificuldades relacionadas ao uso de imagens (*pictures/Bilder*) mecânicas na teoria quântica, ao reinterpretar conceitos mecânicos observáveis, de maneira que estes se adequem à natureza da teoria quântica (Cf. BOHR, 1926, p. 9). No entanto, neste estágio de desenvolvimento, ainda não era possível aplicar a teoria de Heisenberg para todas as questões sobre a estrutura atômica. Mesmo assim, resultados importantes, para áreas distintas, foram obtidos com base na utilização de imagens mecânicas para os fenômenos atômicos, possibilitados pelo princípio de correspondência (Cf. BOHR, 1925, p. 852). Bohr também afirma como as teorias clássicas são fundamentais para nosso conhecimento sobre a estrutura atômica, mas, como de costume, faz uma ressalva:

Anteriormente, neste artigo, foram mencionadas as dificuldades fundamentais envolvidas na construção de imagens da interação entre os átomos, seja por meio de radiação, seja por colisões. Estas dificuldades parecem exigir o abandono de modelos mecânicos no espaço e no tempo, tão característicos da nova mecânica quântica. [...] Para os físicos, a princípio parecerá deplorável que em problemas atômicos tenhamos aparentemente encontrado tal limitação de nossos recursos visuais³³ habituais. Este pesar, entretanto, terá que dar lugar ao agradecimento de que a matemática, também neste campo, nos apresenta as ferramentas para preparar o caminho para novos progressos. (BOHR, 1925, p. 852, tradução do autor)³⁴.

³⁰ Original em inglês: *the visualisation [sic] of the stationary states by mechanical pictures has brought to light a far-reaching analogy between the quantum theory and the mechanical theory.*

³¹ No inglês, os termos utilizados são *rational transcription* (transcrição racional), enquanto no alemão são *sinn-gemäßer Umdeutung* (reinterpretação adequada), cf. Bohr, 1925, p. 849 e Bohr, 1926, p. 5, respectivamente.

³² Vale destacar a dimensão coletiva do desenvolvimento da teoria quântica, ao utilizar a palavra programa. Dentre os textos discutidos até então, no presente artigo, é a primeira vez que Bohr se expressa nesses termos, destacando que há uma agenda de pesquisa em teoria quântica, na qual o princípio de correspondência é a noção de convergência.

³³ No alemão, o termo utilizado é *Anschaungsmittel*, que pode ser traduzido como recursos visuais.

³⁴ Original em inglês: *These difficulties seem to require just that abandoning of mechanical models in space and time which is so characteristic a feature in the new quantum mechanics. [...] To the physicists it will at first seem deplorable*

Nesta afirmação, um tanto provocativa, que encerra o artigo, pode-se perceber que a matemática possui um papel importante na construção do conhecimento sobre os fenômenos naturais, mas que física e matemática não são a mesma coisa, nem devem ser confundidas. Ao enfatizar que a matemática fornece as ferramentas que possibilitam o desenvolvimento da física, Bohr também se posiciona contra uma certa estagnação desta última, atitude bem ilustrada em suas defesas por uma generalização das ideias da física clássica.

Em um artigo publicado na *Encyclopædia Britannica* em 1926, *Atom*, Bohr reafirma muitas de suas ideias aqui apresentadas, como o fato de, simultaneamente, os postulados quânticos não possibilitarem uma construção de uma imagem mecânica para os processos atômicos, mas, por outro lado, em casos de estados estacionários, possibilitar a elaboração de uma representação para o átomo, que fornece boas explicações para as mais distintas áreas (BOHR, 1926a). Tal repetição é mais uma demonstração de que Bohr realmente não apenas não possuía uma indisposição com uma descrição contínua no espaço-tempo, mas como ele buscou indicar sob quais condições é possível se obter uma imagem mecânica para o átomo. Outra noção destacada em *Atom* é o elemento simbólico que existe na relação entre a física clássica e a teoria quântica:

É claro, entretanto, pela natureza dos postulados, que tal imagem mecânica dos estados estacionários pode ter apenas um caráter simbólico³⁵. Isto é, talvez mais claramente manifestado pelo fato de que

that in atomic problems we have apparently met with such a limitation of our usual means of visualisation [sic]. This regret will, however, have to [sic] give way to thankfulness that mathematics, in this field too, presents us with the tools to prepare the way for further progress.

³⁵ Para Catherine Chevalley (1994; 1996; 1999), Bohr aproxima *Anschauung*, símbolo (*Symbol*) e linguagem na descrição dos fenômenos físicos. Nas descrições de Bohr, indica a filósofa, o formalismo quântico aparece como um esquema simbólico, enquanto a física clássica costuma vir acompanhada de termos como “representação” e “conceitos”. Para Chevalley: [...] *there seems to be a clear contrast in Bohr's mature lexicon between two sets of correlated ideas: on the one hand 'symbols' implies no Anschaulichkeit and a new kind of objectivity in relativity theory and quantum physics; while on the other hand 'concepts' or 'pictures' entail Anschaulichkeit and the objectivity of classical physics* (CHEVALLEY, 1994, p. 38). Esta utilização de símbolos nas ciências da natureza faz parte de um processo que já estava em curso no século XIX, em especial na tradição pós kantiana (Ibid.). Para Chevalley, desde este período a linguagem já era considerada um aspecto fundamental no desenvolvimento do conhecimento científico, de maneira que tanto na física, quanto na matemática, já apareciam elementos que não podiam ser apresentados intuitivamente, de maneira que a ciência já realizava uma revisão das noções de *Anschaulichkeit* e objetividade (Cf. Chevalley, 1996, p. 234). De acordo com Chevalley: *My first conjecture is that in the very genesis of quantum theory, the trend of thought which emphasized a "symbolic turn" contributed to shaping Bohr's interpretation of the situation in atomic physics. [...] Indeed, after 1924 Bohr always called "symbols" those elements of the quantum formalism which could not have a correlate in intuition, in contrast with the idea of "concepts" of classical physics, which admitted an intuitive interpretation. Moreover, by "symbolism" he consistently referenced the characteristic non-an-schaulich feature of contemporary physics. So we may conclude that Bohr deliberately used the idea of symbol to refer*

as frequências da revolução orbital nestas imagens não têm conexão direta com as frequências da radiação emitida pelo átomo. No entanto, as tentativas de visualizar os estados estacionários por imagens mecânicas trouxeram à luz uma analogia de longo alcance entre a teoria quântica e a teoria clássica. (BOHR, 1926a, p. 264, tradução do autor)³⁶

Analogias possibilitadas, nas mais distintas áreas que trabalham com sistemas atômicos, pelo princípio de correspondência.

Além das reafirmações de teses consideradas basilares, Bohr adiciona um novo elemento. A partir de estudos feitos na época, foi possível verificar que os elétrons possuem um *momentum* magnético associado à rotação em torno de um eixo partindo de seu centro (que viria ser conhecido como *spin*) (Cf. BOHR, 1926a, p. 265). Este efeito explicaria não apenas as anomalias do efeito Zeeman³⁷, como também fornece uma explicação natural para as leis empíricas que governam o número atômico (Cf. BOHR, 1926a, p. 265).

Neste mesmo ano, Bohr escreve uma breve nota ao editor para o artigo *Spinning Electrons and the Structure of Spectra*, dos físicos George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit, os proponentes do *spin* (UHLENBECK; GOUDSMIT, 1926). Nesta nota, destaca-se o entusiasmo com esta hipótese, indicando que ela pode implicar em alterações na própria teoria quântica. O *spin*, além de possibilitar uma aplicação mais abrangente do princípio de correspondência, poderia ser capaz de “[...] explicar mais extensivamente as propriedades dos elementos por meio de modelos mecânicos” (BOHR, 1926b, p. 265, tradução do autor)³⁸.

Antes de prosseguir com a apresentação dos artigos, vale destacar algumas noções importantes no pensamento de Bohr. Apesar do princípio de correspondência ter sido proposto

to circumstances or phenomena where, in his words, no intuitive presentation was possible (CHEVALLEY, 1996, p. 240-241).

³⁶ Original em inglês: *It is clear, however, from the nature of the postulates, that such a mechanical picture of the stationary states can have only a symbolic character. This is, perhaps most clearly manifested by the fact that the frequencies of the orbital revolution in these pictures have no direct connection with the frequencies of the radiation emitted by the atom. Nevertheless, the attempts at visualising [sic] the stationary states by mechanical pictures have brought to light a far-reaching analogy between the quantum theory and the classical theory.*

³⁷ Observado em 1896 pelo físico neerlandês Pieter Zeeman, este efeito consiste no deslocamento (separação) das linhas espectrais quando um átomo, por exemplo, é submetido a um campo magnético externo. O efeito Zeeman é utilizado, principalmente, para a determinação da multiplicidade dos números quânticos dos níveis de energia (EISBERG; RESNICK, 1979; PESSOA JR, 2003).

³⁸ Original em inglês: “[...] to account more extensively for the properties of elements by means of mechanical models.

formalmente apenas no final da década de 1910 e início de 1920 (CHEVALLEY, 1991), desde o primeiro trabalho apresentado aqui - *On the constitution of atoms and molecules* (1913) -, pode-se perceber que uma de seus principais aspectos já está presente: a generalização das ideias da física clássica. Outro aspecto importante é a tentativa de conectar, a partir de um princípio geral (a correspondência), diferentes teorias e leis empíricas sobre os fenômenos quânticos. No início do século XX, muito se discutia sobre a composição do fenômeno luminoso: haviam boas razões para considerar tanto uma descrição corpuscular, quanto ondulatória. Entretanto, eram descrições que, apesar de sólidas em suas respectivas áreas, eram aparentemente contraditórias entre si (FEYERABEND, 1958; 1961). Bohr, atento a este dilema, optou por não fazer uma escolha entre uma descrição ou outra (como era comum na física), mas considerou que ambas as descrições eram válidas, teoricamente consistentes e empiricamente testadas. Necessitava-se, portanto, não de um conceito unificador (algo que, até o momento, parecia improvável devido as contradições entre as duas noções), mas de uma generalização capaz de fornecer explicações para os variados estudos sobre o sistema atômico, independente da descrição adotada em cada teoria ou processo empírico. Como o próprio físico dinamarquês afirmou anos mais tarde, era preciso um princípio que desse conta de interpretar os mais variados estudos sobre os fenômenos quânticos e que, ao invés de tentar eliminar suas contradições, as generalizasse.

Pelo que foi exposto, pode-se dizer que este é o espírito da correspondência, uma espécie de epistemologia geral o suficiente para agregar as mais variadas pesquisas sobre o regime quântico. Tal esforço também é constatado pela filósofa Catherine Chevalley, ao argumentar que, diante de tantas situações paradoxais nos estudos sobre os fenômenos quânticos, Bohr constrói uma espécie de base epistemológica, a fim de colocar em comum acordo os membros dos grupos Copenhague – Göttingen (CHEVALLEY, 1994a; 1996). De maneira similar, o físico e filósofo Paul Feyerabend também destaca que Bohr, ao perceber a carência física e filosófica de sua época para explicar os fenômenos quânticos, elabora sua própria filosofia, partindo de múltiplas influências (FEYERABEND, 1961). Diante disto, pode-se questionar: se a correspondência é a base epistemológica comum dos estudos sobre os fenômenos quânticos, qual papel desempenha o conceito bohriano que mais ganhou notoriedade, o princípio de complementaridade?

Complementaridade e a natureza dual do fenômeno luminoso

The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory (1928), também conhecido por *Como Lecture*³⁹, é o artigo no qual encontramos as formulações “oficiais” sobre a complementaridade. No entanto, antes de analisar o conteúdo deste texto, vale destacar dois manuscritos⁴⁰ não publicados, datados de 1927. Intitulados *Philosophical Foundation of the Quantum Theory* (1927a) e *Fundamental Problems of the Quantum Theory* (1927b), estes manuscritos são uma espécie de laboratório das ideias apresentadas em *Como*. É nestes dois textos que aparece, pela primeira vez, uma menção direta à complementaridade (apesar de ser possível encontrar as bases desse conceito desde 1913) (CHEVALLEY, 1991).

Nestes manuscritos, Bohr destaca a dificuldade em se desenvolver uma descrição adequada para os fenômenos quânticos, baseada somente na teoria de Planck (BOHR, 1927a). Em razão do contraste entre a descrição ordinária dos fenômenos naturais da física clássica e do elemento de discretização, presente na teoria quântica, Bohr argumenta que devemos estar preparados para aceitar que os conceitos clássicos possuem somente validade limitada, quando utilizados nos processos atômicos (Cf. BOHR, 1927a, p. 69). No entanto, com as elaborações de Einstein sobre os *quanta* de luz, foi possível trazer novos elementos acerca da natureza do fenômeno luminoso e superar algumas dificuldades. Dentre elas, a relação entre onda e partícula, pois “[...] a descrição do comportamento das chamadas partículas materiais se baseia tão inteiramente na ideia corpuscular, de maneira que nenhuma conexão direta entre a cinemática das ondas de luz e da troca de energia e impulso com a matéria” (BOHR, 1927a, p. 70, tradução do

³⁹ Devido a apresentação do artigo nos *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici* (Anais do Congresso Internacional de Física), em Como - Itália, em setembro de 1927.

⁴⁰ Vale destacar também que a *Como Lecture* é fruto de uma síntese de 195 folhas manuscritas em dinamarquês, alemão e inglês, contendo quatro caligrafias distintas: Oskar Klein (físico sueco), Margrethe Nørlund Bohr (esposa de Niels Bohr e editora de uma série de seus escritos), a do próprio Bohr, além de uma quarta não identificada (Cf. RÜDINGER e KALCKAR, 1985, p. 58). A escrita em conjunto com outras pessoas era algo comum em Bohr. Muitos de seus artigos, principalmente aqueles não publicados originalmente em dinamarquês, foram escritos por Margrethe Nørlund Bohr, assistentes (como ocorreu com o físico holandês Hendrik Anthony Kramers) e Ellen Adler Bohr (mãe de Niels Bohr) (KOJEVNIKOV, 2020). Kojevnikov narra, com base em cartas dos envolvidos, que era comum Bohr andar pelo cômodo, enquanto falava suas ideias para a pessoa responsável pela escrita. Algo que surtiu diversos desentendimentos, pois frequentemente Bohr não ficava satisfeito com o resultado (Cf. KOJEVNIKOV, 2020, p. 18).

autor)⁴¹ pode ser obtida. Devido a estes desenvolvimentos recentes, o que antes era considerado um dilema – a opção entre a descrição corpuscular ou ondulatória –, ganha uma nova configuração, “[...] sendo a questão não uma escolha entre dois conceitos rivais, mas sim a descrição de dois lados complementares do fenômeno” (BOHR, 1927a, p. 69, tradução do autor)⁴². Nesta pequena citação, há ideias importantes: onda e partícula não são conceitos que rivalizam, mas esta dualidade é característica à própria natureza do fenômeno luminoso; como consequência, a tarefa situa-se não na escolha entre uma descrição ou outra, mas na elaboração de uma teoria que, admitindo suas contradições, interligue ambas. Pelas relações

$$E=hv \text{ e } P=h\sigma,$$

onde h é a constante de Planck, ν e σ os números de vibração por unidade de tempo e onda por unidade de comprimento, respectivamente, e sabendo-se que $\nu = \frac{1}{\tau}$ (τ o período) e $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ (λ comprimento de onda), temos que onda e partícula são aspectos complementares de um mesmo fenômeno (Cf. BOHR, 1927b, p. 76).

A natureza complementar dos fenômenos luminosos é o assunto principal do artigo de 1928. Como argumenta Chevalley, se lida isolada e/ou tomada como ponto de partida para o pensamento bohriano, a *Como Lecture* pode ser considerada “obscura” (CHEVALLEY, 1999), devido a grande quantidade de ideias apresentadas e articuladas, sem, em alguns casos, uma devida fundamentação. No entanto, vale destacar que este artigo é fruto de 195 folhas manuscritas, além de ser uma espécie de síntese de reflexões que datam mais de uma década. Logo, se analisada neste contexto mais amplo de um longo desenvolvimento teórico, como indica Chevalley (1999), *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory* é um bom

⁴¹ Original em inglês: “[...] the description of the behaviour of the so-called material particles rested so entirely on the corpuscular idea that no direct connection between the kinematics of light waves and of the exchange of energy and momentum with matter.

⁴² Original em inglês: “[...] the question being not a choice between two rivalising concepts, but rather of the description of two complementary sides of the phenomenon.

quadro expositivo tanto para o pensamento bohriano, quanto para a agenda de pesquisa em física liderada por ele.

Já na introdução, Bohr externa sua esperança de que as ideias reproduzidas em *Como Lecture* possam servir para harmonizar as diferentes perspectivas sobre os fenômenos atômicos (Cf. BOHR, 1928, p. 580). Para intérpretes como Mara Beller (1999), esta atitude de Bohr não seria uma demonstração de seu caráter democrático, mas de sua postura autoritária enquanto líder do Instituto de Física Teórica de Copenhague. É sabido que, de fato, em especial a partir da segunda metade da década de 1920, a palavra de Bohr sobre como proceder nos estudos dos fenômenos quânticos adquiriu peso estatutário (BALSAS; VIDEIRA, 2013; KOJEVNIKOV, 2020). Sem ignorar estes aspectos, consideremos também como motivações a construção de uma base epistemológica comum para a pesquisa em quântica. Vista nesta perspectiva, esta breve introdução é uma reafirmação do que o físico dinamarquês destacou ao longo dos últimos anos: que, apesar das contradições existentes, é possível interpretar os fenômenos atômicos a partir de uma base comum – a correspondência.

Neste sentido, ao falar sobre a natureza da luz, Bohr afirma:

De fato, aqui também não estamos lidando com concepções contraditórias, mas [com concepções] complementares dos fenômenos, que apenas juntas oferecem uma generalização natural do modo clássico de descrição. Na discussão dessas questões, de acordo com a perspectiva acima, deve-se ter em mente que tanto a radiação no espaço livre, quanto as partículas materiais isoladas, são abstrações, sendo suas propriedades na teoria quântica definíveis e observáveis apenas por meio da interação com outros sistemas. Contudo, estas abstrações são, como veremos, indispensáveis para uma descrição da experiência que tenha ligação com o nosso ponto de vista espaço-temporal ordinário. (BOHR, 2000, p. 138-139)

Ou seja, a luz, enquanto entendida como radiação no espaço livre ou partículas isoladas, é uma abstração, fundamental para o desenvolvimento teórico, mas ainda assim uma abstração. Há, aparentemente, um argumento ontológico por de trás dessa colocação. Para Bohr, apesar da importância que as concepções ondulatória e corpuscular possuem na história da física, a separação destas possui valor puramente simbólico, pois, a nível atômico, onda e partícula são, em certo sentido, inseparáveis. Em outras palavras, a dualidade é natural ao fenômeno luminoso. No entanto, devido à impossibilidade de expressar esse conceito pelas ideias ordinárias

da física clássica, i.e., com base em uma imagem mecânica, “tal procedimento torna necessário um afastamento adicional em relação à visualização [*Anschaulichkeit*] no sentido usual” (BOHR, 2000, p. 142), acrescido da faculdade de abstração (*Abstraktionsvermögen*). Esta abstração seria a responsável pela conexão dos conceitos clássicos com o formalismo simbólico da teoria quântica.

A utilização de abstrações (em conexão com ideias clássicas) na descrição de fenômenos não é algo novo na física, empregado somente na teoria quântica. Se analisarmos teorias e leis sobre o interior do átomo, é possível perceber que todo o conhecimento produzido depende de experimentos envolvendo reações de colisão e radiação, que são interpretadas com base em situações ideais (em que outras possíveis interações são ignoradas) (Cf. BOHR, 1928a, 586). Bohr utiliza esta característica da física clássica (o uso de imagens/representações visualizáveis, descritas no espaço-tempo, mas também de situações hipotéticas, abstratas) como contra argumento para a exigência de visuabilidade (*Anschaulichkeit*) por meio de uma imagem mecânica descrita espaço-temporalmente (Cf. BOHR, 1928b, p. 253). De maneira geral, para Bohr, toda a perspectiva espaço-temporal dos fenômenos, assim como as definições de energia e *momentum*, dependem de abstrações.

Neste sentido, o conceito de complementaridade, além de fornecer uma interpretação para as aparentes contradições entre as distintas perspectivas nos estudos sobre os fenômenos atômicos, possibilitaria também, junto da correspondência, preparar o terreno da física para a renúncia da demanda por visuabilidade, nos moldes de uma imagem mecânica espaço-temporalmente contínua. Para Bohr, as reinterpretações provocadas pela complementaridade, são similares às causadas pela relatividade, pois, “[...] nos encontramos aqui no mesmo caminho tomado por Einstein de adaptar nossos modos de percepção [*Anschauungsformen*], tomados emprestados a nossas sensações, ao conhecimento gradativamente aprofundado das leis da Natureza” (BOHR, 2000, p. 159).

Correspondência e Complementaridade: dois princípios indissociáveis

Em 1929, Bohr publica dois artigos⁴³ - *Wirkungsquantum und Naturbeschreibung* e *Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturbeschreibung* -, onde revisita algumas de suas principais ideias e as apresenta de forma mais detalhada, já levando em consideração os princípios de correspondência e complementaridade. Bohr inicia *Wirkungsquantum und Naturbeschreibung* elogiando os estudos de Planck, em especial a descoberta do *quantum* de ação que, para ele, foi um marco na física tanto no que diz respeito ao ordenamento da experiência, quanto para revermos os fundamentos utilizados na descrição dos fenômenos naturais (Cf. BOHR, 1931, p. 60). Essa revisão iniciou-se com Planck e encontrou seu clímax na teoria quântica. No entanto, este clímax só foi possível com a renúncia do modo causal de descrição no espaço-tempo, tão familiar à física clássica, ao constatar-se que não seria possível uma compreensão adequada dos fenômenos quânticos, com base em nossas impressões sensoriais imediatas (*unmittelbaren Sinneseindrücken*) (Cf. BOHR, 1931, p. 60). Algo que não deve nos causar espanto, pois “sempre estivemos preparados para encontrar uma falha de nossas formas de percepção [*Anschauungsformen*], que são adaptadas às nossas percepções sensoriais [*Sinneswahrnehmungen*]” (BOHR, 1931, p. 60, tradução do autor)⁴⁴.

Esta insuficiência das ideias clássicas estaria diretamente ligada à objetividade e à realidade dos fenômenos quânticos. Enquanto na física clássica é possível separar sujeito de objeto (observação e objeto em análise), no regime quântico isto não é mais possível, vide as perturbações causadas pela interação, que não mais podem ser negligenciadas. Esta situação seria um retrato do problema em que a conexão entre objetividade e observação se encontra, ao tratar de fenômenos quânticos (Cf. BOHR, 1931, p. 61). Sobre esta relação entre objetividade e observação, argumentava-se que o arcabouço teórico da física clássica era suficiente para fornecer

⁴³ Os artigos publicados em 1929 foram originalmente publicados em alemão e dinamarquês, mas posterior foram traduzidos para o inglês e publicado no livro *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, publicado em 1931. Neste livro também contém a versão alemã de *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory* e *Atomic Theory and Mechanics*. Os quatro textos juntos podem ser considerados como uma apresentação robusta e ampla dos principais pontos do pensamento bohriano.

⁴⁴ Original em alemão: [...] von jeher war man aber darauf gefaßt, eben hier auf ein Versagen unserer den Sinneswahrnehmungen angepaßten Anschauungsformen zu stoßen.

uma interpretação satisfatória acerca dos fenômenos. No entanto, Bohr destaca que, ao analisarmos o fenômeno luminoso nos moldes da própria física clássica, são necessárias duas representações distintas (corpúscular e ondulatória), a fim de uma melhor compreensão do fenômeno.

Devido à aparente impossibilidade de se unificar ambas as concepções por vias da física clássica, o *quantum* de ação e a complementaridade são os conceitos que tornam essa dualidade compreensível (Cf. BOHR, 1931, p. 61). Como conciliar a necessidade de se descrever a experiência em termos clássicos, com o formalismo simbólico da teoria quântica? Sobre isto, Bohr argumenta que ao descrevermos os fenômenos físicos - principalmente aqueles que ultrapassam as noções usuais dos conceitos clássicos (que não podem ser descritos em termos de velocidade, posição, *momentum* etc., simultaneamente) -, há certo grau de variabilidade, pois estes estão atrelados às escolhas arbitrárias que dependem de nossos pontos de vista e, neste sentido, devemos estar preparados para aceitar que uma elucidação mais abrangente requer a utilização de perspectivas distintas (Cf. BOHR, 1931, p. 62-63). Sobre este aspecto, Bohr faz uma comparação interessante entre a matemática e as ciências da natureza. Enquanto na primeira somos capazes de construir leis, axiomas, postulados que satisfazem nossa idealização por objetividade, ou seja, são invariantes e podem-se dizer provados dentro de seus limites de aplicabilidade; na segunda isto não ocorre, pois temos de lidar com o aparecimento de novos fenômenos, que não necessariamente se adequam ao arcabouço teórico estabelecido, requisitando, neste sentido, a revisão de nossos conceitos fundamentais (Cf. BOHR, 1931, p. 63).

Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturbeschreibung, em certo sentido, é uma continuação da discussão de *Wirkungsquantum und Naturbeschreibung*. Bohr argumenta que o conhecimento sobre o regime atômico possui um duplo aspecto: ao mesmo tempo que não há dúvidas sobre a realidade dos átomos (em razão dos resultados experimentais e descobertas da época sobre a estrutura atômica), eles não podem ser descritos através de imagens visualizáveis (*anschauliche Bilder*) (Cf. BOHR, 1931, p. 67). Paralelamente, enquanto a descrição usual da natureza (i. e., nos moldes da física clássica) é caracterizada pela continuidade, a descrição atômica dos fenômenos requer elementos descontínuos. Para Bohr:

A situação em que nos encontramos aqui é caracterizada pelo fato de que parece que somos obrigados a escolher entre duas imagens [*Bildern*] contraditórias da propagação da luz, por um lado a representação [*Vorstellung*] ondulatória da luz, por outro a concepção [*Auffassung*] corpuscular da teoria do quantum de luz, ambas expressando lados essenciais, mas diferentes, da experiência. (BOHR, 1931, p. 70, tradução do autor)⁴⁵

Este aparente dilema, argumenta Bohr, que nos é imposto pela própria natureza, requer o abandono consciente (termo usado por ele) de nossas concepções sobre causalidade e visibilidade, de maneira que seja possível tornar os fenômenos quânticos compreensíveis (Cf. BOHR, 1931, p. 70). Entretanto, a maneira pela qual interagimos com o mundo, os termos utilizados para comunicar os resultados experimentais e teorias de maneira inteligível, são marcados pelas noções clássicas, de forma que estas são imprescindíveis na compreensão da natureza. Bohr reforça sua tese de que o princípio de correspondência é uma espécie de chave de abóboda entre a necessidade das ideias clássicas na descrição da natureza e os fenômenos quânticos. Ele argumenta:

No entanto, nós encontramos um ponto de partida para a utilização de tais conceitos fora do campo de validade das teorias clássicas na exigência pela conexão direta da descrição teórico-quântica com o modo usual de descrição na área limítrofe, na qual podemos desconsiderar o *quantum* de ação. Os esforços no interior da teoria quântica para utilizar cada termo clássico em uma reinterpretação, que atendesse a esse requisito, sem contradizer o postulado da indivisibilidade do *quantum* de ação, encontrou expressão no chamado Princípio da Correspondência. (BOHR, 1931, p. 72, tradução do autor)⁴⁶

Através desta reinterpretação (*Umdeutung*) dos conceitos clássicos e sua utilização (mesmo que em seus casos limítrofes), sem violar o postulado quântico, seria possível a

⁴⁵ Original em alemão: *Die Lage, in der wir uns hier befinden, ist dadurch gekennzeichnet, daß wir scheinbar gezwungen sind, zwischen zwei sich widersprechenden Bildern der Lichtausbreitung zu wählen, auf der einen Seite die Vorstellung der Lichtwellen, auf der anderen Seite die corpusculare Auffassung der Lichtquantentheorie, welche beide wesentliche, aber verschiedene Seiten der Erfahrung zum Ausdruck bringen.*

⁴⁶ Original em alemão: *Einen Anhaltspunkt für die Nutzbarmachung solcher Begriffe außerhalb des Gültigkeitsbereichs der klassischen Theorien haben wir indessen in der Forderung des unmittelbaren Anschlusses der quantentheoretischen Beschreibung an die gewöhnliche Beschreibungsweise in dem Grenzgebiet gefunden, in dem wir vom Wirkungsquantum absehen können. Die Bestrebungen innerhalb der Quantentheorie, jeden klassischen Begriff in einer Umdeutung zu verwenden, die, ohne mit dem Postulat von der Unteilbarkeit des Wirkungsquantums in Widerspruch zu stehen, dieser Forderung entgegenkommt, fanden einen Ausdruck in dem sog. Korrespondenzprinzip.*

formulação de uma teoria quântica coerente, que se apresente como uma generalização natural do modo clássico de descrição.

Para Bohr, há um limite, imposto pela própria natureza (Cf. BOHR, 1931, p. 75), de até que ponto podemos afirmar que determinado fenômeno existe objetivamente; e esta objetividade, assim como sua possibilidade de descrição, se expressa na mecânica quântica (Cf. BOHR, 1931, p. 75). Entretanto, a existência deste limite não significa um obstáculo para o desenvolvimento do conhecimento, desde que estejamos preparados para desistir de *nossas* demandas por visibilidade na descrição da natureza (Cf. BOHR, 1931, p. 72). Desta maneira, a teoria quântica, possibilitada pela correspondência e complementaridade, se apresenta como uma generalização da física clássica. Não em decorrência da explicação de fenômenos mais gerais (como ocorre na relação entre a física newtoniana e a relatividade), mas porque a teoria quântica consegue expandir a descrição dos fenômenos naturais para além dos limites das demandas por visibilidade e causalidade; tornando o formalismo simbólico da mecânica quântica compreensível. Por outro lado, os conceitos clássicos constituem não apenas a base, mas são imprescindíveis para que esta descrição dos fenômenos quânticos, que foge às formas da percepção, seja inteligível.

Considerações Finais

Intérpretes como Catherine Chevalley (1994b; 1999), Henry Folse (1994), David Favrholt (1994) e Alisa e Peter Bokulich (2005) estão de acordo que, no processo de construção da interpretação de Bohr, influências distintas podem ser identificadas, em virtude de um certo pluralismo filosófico empregado pelo físico dinamarquês (como ele mesmo admitia ter feito) (Cf. BOHR, 1931, p. 62).

Chevalley (1994b), Folse (1994) e Favrholt (1994) consideram como um dos pilares do pensamento bohriano a resistência em abandonar os conceitos clássicos, ao mesmo tempo que os reinterpreta. Esta resistência teria como origem sua defesa de que a descrição da

natureza, através dos conceitos clássicos, é uma espécie de refinamento da linguagem⁴⁷ usada cotidianamente; na qual a descrição dos fatos separa sujeito e objeto (Cf. FAVRHOLDT, 1994, p. 78). Apesar de não ser o foco do presente artigo, vale destacar que a linguagem na construção do conhecimento físico é um aspecto substancial no pensamento do físico dinamarquês. Em diversos de seus escritos, Bohr se posicionava contrariamente à criação de conceitos que fossem puramente quânticos, ou seja, não fossem noções conhecidas pela física clássica (BOHR, 1928; 1931; 1961). Parte desta resistência, se deve à concepção de que nossa linguagem é marcada pela distinção entre sujeito e objeto e que o conhecimento científico é uma espécie de refinamento da linguagem comum, do cotidiano. Neste sentido, não faria sentido a criação de todo um novo léxico conceitual, fora dos termos da física clássica, pois estaria fora do escopo de nossa própria capacidade de comunicar essas informações, de atribuir sentido (CHEVALLEY, 1999; FOLSE, 1994; FAVRHOLDT, 1994).

Logo, a teoria quântica deve ser compreendida não como um rompimento com a física que vinha sendo desenvolvida até então, mas como uma continuidade - possibilitada pela complementaridade e por uma base epistemológica comum (correspondência), que atuam como conceitos reconciliadores entre as ideias clássicas e o formalismo simbólico da mecânica quântica (CHEVALLEY, 1994a; 1994b; BOKULICH; BOKULICH; 2005).

Apesar de considerar que a teoria quântica é uma continuidade e generalização das ideias da física clássica, Folse (1994) argumenta que, filosoficamente, Bohr rompe e reorganiza a noção de realismo em física, que teria como princípio as seguintes teses:

Realismo ôntico: é racional acreditar que as entidades e processos postulados por nossas melhores teorias realmente existem, e Realismo Epistêmico: essas mesmas teorias aspiram a fornecer qualquer conhecimento sobre essas entidades e processos que seja possível ao ser humano alcançar. [...] A Tese Epistêmica do Representacionalismo Mecânico (ou o "ideal da visuabilidade"): para ter conhecimento de uma entidade ou processo é preciso ser capaz de formar uma imagem espaço-temporal no qual essa entidade ou processo é descrito (ou seja, 'representado') por uma gama de

⁴⁷ Outro importante elemento no pensamento bohriano é o papel da linguagem na construção do conhecimento físico. Em diversos de seus escritos, Bohr se posicionava contrariamente à criação de conceitos que fossem puramente quânticos, ou seja, não fossem noções conhecidas pela física clássica (BOHR, 1928; 1931; 1961). Parte desta resistência, se deve à concepção de que nossa linguagem é marcada pela distinção entre sujeito e objeto e que o conhecimento científico é uma espécie de refinamento da linguagem comum, do cotidiano. Neste sentido, não faria sentido a criação de todo um novo léxico conceitual, fora dos termos da física clássica, pois estaria fora do escopo de nossa própria capacidade de comunicar essas informações, de atribuir sentido (CHEVALLEY, 1999; FOLSE, 1994; FAVRHOLDT, 1994).

predicados que possuem uma correspondência um-para-um com propriedades inerentemente possuídas por uma entidade ou processo real na natureza. (FOLSE, 1994, p. 125, tradução do autor)⁴⁸

Através da aproximação entre realismo e mecanicismo, estrutura-se o suporte à seguinte noção sobre as propriedades atômicas:

A Doutrina das Propriedades Primárias: A fim de fornecer uma representação espaço-temporal das entidades e processos [exigido pelo Representacionalismo Mecânico acima], as entidades devem ser caracterizadas como possuindo pelo menos aquelas propriedades que servem para localizá-las no espaço em cada instante do tempo, e processos em um intervalo temporal finito. (FOLSE, 1994, p. 125, tradução do autor)⁴⁹

Nota-se que, de acordo com a tese supracitada, as entidades físicas devem possuir características inerentes, com a quais seja possível ao menos descrevê-las espaço-temporalmente. Bohr, em diversos momentos, argumenta que a utilização de exemplos hipotéticos onde partículas e ondas são consideradas em situações em que não há qualquer tipo de interação com outras entidades (estão idealmente isoladas), são apenas exercícios abstratos e admite o caráter relacional das propriedades dos objetos físicos (BOHR, 1928a, 1931). Voltando a Folse, a concepção de que as entidades físicas possuem características intrínsecas, é a base da noção de objetividade na descrição mecanicista. Neste sentido, a doutrina das propriedades primárias seria uma espécie de conexão da tese epistêmica do representacionalismo materialista, com sua contraparte ontológica, que Folse define como *“tese ontológica do materialismo mecanicista: O mundo natural consiste exclusivamente de substâncias, “entidades”, que inerentemente possuem apenas as propriedades que lhes são conferidas em sua representação na teoria mecânica”*

⁴⁸ Original em inglês: *Ontic Realism: it is rational to believe that the entities and processes postulated by our best theories really do exist, and Epistemic Realism: these same theories aspire to provide whatever knowledge of these entities and processes it is possible for human beings to attain. [...] The Epistemic Thesis of Mechanistic Representationalism (or the 'ideal of visualizability'): to have knowledge of an entity or process one must be able to form a spatio-temporal picture in which that entity or process is described (i.e. 'represented') by a range of predicates which hold a one-to-one correspondence with properties inherently possessed by a real entity or process in nature.*

⁴⁹ Original em inglês: *The Doctrine of Primary Properties: In order to provide the spatio-temporal picture of entities and processes [required by Mechanistic Representationalism above], entities must be characterized as inherently possessing at least those properties which serve to locate them in space at each instant of time, and processes over a finite temporal interval.*

(FOLSE, 1994, p. 125, tradução do autor)⁵⁰. Da aproximação entre estas cinco teses (realismo ôntico, realismo epistêmico, representacionalismo mecanicista, a doutrina das propriedades primárias e mecanicismo materialista) estrutura-se o realismo atomista clássico (FOLSE, 1994).

Ao compararmos os argumentos de Bohr com estas teses, sua classificação torna-se algo complexo. Bohr rompe com as teses do realismo atomista clássico, mas não as abandona completamente. Ao menos não todas as teses. Para Folse, apesar de romper com o mecanicismo materialista, com a doutrina das propriedades primárias e representacionalismo mecanicista, Bohr não renuncia o realismo ôntico com relação ao átomo, ao afirmar que a existência destes estão comprovadas, para além de qualquer dúvida (como foi destacado anteriormente) (FOLSE, 1994).

Neste sentido, como indicam Chevalley (1994a) e Folse (1994; 2001), de fato parece haver uma lição epistemológica por de trás da complementaridade, que culmina na generalização natural do modo de descrição. No entanto, se consideramos o processo de construção do pensamento bohriano, como apresentado aqui, o peso epistemológico parece pender mais para a correspondência, do que para a complementaridade. Como o próprio Bohr nos informa, o processo pelo qual somos capazes de compreender e trazer a um denominador comum duas concepções sobre a luz, aparentemente não passíveis de unificação, é a correspondência (Cf. BOHR, 1931, p. 72). A base epistemológica comum entre Copenhague – Göttingen é a correspondência (CHEVALLEY, 1994a; 1996). Por outro lado, também encontramos em Bohr colocações sobre a existência do átomo, sobre as diferentes teorias e leis que comprovam tanto o comportamento ondulatório, quanto corpuscular da luz e, como já exposto anteriormente, afirmações como “[...] sendo a questão não uma escolha entre dois conceitos rivais, mas sim a descrição de dois lados complementares do fenômeno” (BOHR, 1927a, p. 69, tradução do autor) e “[...] não estamos lidando com uma escolha entre uma teoria ondulatória ou corpuscular da luz. De fato, as ideias de onda e corpúsculo são capazes apenas de explicar o lado complementar do fenômeno”

⁵⁰ Original em inglês: *The Ontological Thesis of Mechanistic Materialism: The natural world consists exclusively of substances. 'entities', which inherently possess only those properties accorded to them in their representation in mechanical theory.*

(BOHR, 1927b, p. 76, tradução do autor)⁵¹. Ou seja, há uma característica imposta pela própria natureza (em suas palavras), a qual não se trata de uma escolha entre onda, ou partícula. Somente é possível obter uma compreensão e, conseqüentemente, uma descrição adequada do fenômeno luminoso quando ambas são consideradas. Não a partir de uma unificação, mas de uma generalização. Esta característica é justamente o espírito da complementaridade.

Por mais que Bohr não tenha utilizado o termo ontologia, parece haver uma lição ontológica por de trás deste princípio: a natureza do fenômeno luminoso é dual e, se quisermos construir uma teoria adequada, não se trata de uma escolha entre onda ou partícula, ou uma unificação de ambas as concepções, mas a clareza de que estamos lidando com aspectos, manifestações de um mesmo fenômeno. Repetindo Bohr, não cabe, portanto, uma escolha entre onda ou partícula, mas a consideração de ambas as concepções na descrição dos fenômenos quânticos.

Referências bibliográficas

- BALSAS, A. *Realismo e Localidade em Mecânica Quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013.
- BALSAS, A; VIDEIRA, A. A. L. Truth by fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. *Revista Brasileira de História da Ciência*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, 2013, p. 248-266.
- BELLER, M. *Quantum dialogue: the making of a revolution*. Chigago & Londres: University of Chicago Press, 1999.
- BITBOL, M. *Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics*. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1996, p. 34-78.
- BOHM, D. *Causalidade e acaso na física moderna*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2015.
- BOHR, N. *Atom. Encyclopædia Britannica*, ed. 13, v. 1, 1926, p. 262-267.
- BOHR, N. Atomic Theory and Mechanics. *Supplement to Nature*, n. 2927, 1925, p. 845-852.
- BOHR, N. *Atomtheorie und Naturbeschreibung*. Berlim: Springer, 1931.
- BOHR, N. Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. *Die Naturwissenschaften*, v. 16, 1928b, p. 245-257.
- BOHR, N. Fundamental Problems of the Quantum Theory (1927b). In: RÜDINGER, E.; KALCKAR, J. *Niels Bohr Collected Works: Foundations of Quantum Physics I (1926 – 1932)*. Holanda do Norte: Elsevier Science Publisher B. V., 1985, p. 75-80.

⁵¹ Original em inglês: *we are not dealing with a choice between a wave or corpuscular theory of light. Indeed the wave and corpuscular ideas are able only to account for complementary side of the phenomena.*

- BOHR, N. *O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica*. In: PESSOA JR., O. (org.), *Fundamentos da Física 1 – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, p. 135 -59, 2000.
- BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, v. 151, n. 26, 1913, p. 1-25.
- BOHR, N. On The Quantum Theory of Line Spectra Parts: On the general theory (1918). In: ROSENFELD, L.; NIELSEN, J. R. *Niels Bohr Collected Works: Volume 3 – The Correspondence Principle (1918-1923)*. Holanda do Norte: Elsevier Science Publisher B. V., 1976.
- BOHR, N. On the Quantum theory of radiation and the structure of the atom. *Philosophical Magazine Series 6*, n. 177, v. 30, 1915.
- BOHR, Niels. Philosophical Foundations of the Quantum Theory (1927a). In: RÜDINGER, E.; KALCKAR, J. *Niels Bohr Collected Works: Foundations of Quantum Physics I (1926 – 1932)*. Holanda do Norte: Elsevier Science Publisher B. V., 1985, p. 67-71.
- BOHR, N. Spinning Electrons and the Structure of Spectra (notas ao editor). *Nature*, n. 117, 1926, p. 264-265.
- BOHR, N. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature*, v. 121, 1928a, p. 580-590.
- BOHR, N. The Structure of the Atom. *Supplement to Nature*, n. 2801, 1923, p. 29-44.
- BOKULICH, P.; BOKULICH, A. Niels Bohr's Generalization of Classical Mechanics. *Foundations of Physics*, v. 35, n. 3, marc. 2005, p. 347-371. DOI: 10.1007/s10701-004-1979-5
- CAMILLERI, K. Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation. *Perspectives on Science*, v. 17, 2009, p. 26 - 57.
- CASSIRER, E. *Determinism and indeterminism in Modern Physics*. New Haven: Yale University Press, 1956.
- CHAKRABARTI, C.G.; CHAKRABARTY, I. *Boltzmann Entropy: Probability and Information*, [Online]. 2007. Disponibilidade: arXiv:0705.2850v1.
- CHEVALLEY, C. Física cuántica y filosofía. *Revista de Filosofía*, v. VII, n. 12. Madri: Editorial Complutense, 1994a, p. 477-492.
- CHEVALLEY, C. Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism. In: Faye, J.; FOLSE, H.J. *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 153. Dordrecht: Springer, 1994b, 33 - 55.
- CHEVALLEY, C. Physics as an Art: The German Tradition and the Symbolic Turn in Philosophy, History of Art and Natural Science in the 1920s. In: TAUBER, A. I. *The Elusive Synthesis: Aesthetics and Science*. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 182. Dordrecht: Springer, 1996, p. 227-249.
- CHEVALLEY, C. Why do We Find Bohr Obscure? In: GREENBERGER, D.; REITER, W.L.; ZEILINGER. A. *Epistemological and Experimental Perspectives on Quantum Physics*. Vienna Circle Institute Yearbook, v. 7. Dordrecht: Springer, 1999, p. 59 - 73.
- CHEVALLEY, Catherine; BOHR, N. *Physique atomique et connaissance humaine*. Paris: Folio, 1991.
- CUSHING, J. T. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. 23ª tiragem, Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- FAVRHOLDT, D. Niels Bohr and Realism. In: Faye, J.; FOLSE, H.J. *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 153. Dordrecht: Springer, 1994, p. 77-96.

- FEYERABEND, P. Complementarity (1958). In: GATTEI, Stefano; AGASSI, J. *Physics and Philosophy: Philosophical Papers Volume 4*. Nova York: Cambridge University Press, 2016, p. 49 - 73.
- FEYERABEND, P. Niels Bohr's Interpretation of the Quantum Theory (1961). In: GATTEI, S.; AGASSI, J. *Physics and Philosophy: Philosophical Papers Volume 4*. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2016, p. 74-98.
- FOLSE, H. *Bohr's Conception of the Quantum Mechanical State of a System and Its Role in the Framework of Complementarity*, [Online]. 2002. Disponibilidade: arXiv:quant-ph/0210075.
- FOLSE, H. Bohr's Framework of Complementarity and the Realism Debate. In: Faye, J.; FOLSE, H.J. *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 153. Dordrecht: Springer, 1994, p. 117-139.
- HAUBOLD, H.; MATHAI, A.; SAXENA, R. Boltzmann-Gibbs Entropy Versus Tsallis Entropy: Recent Contributions to Resolving the Argument of Einstein Concerning "Neither Herr Boltzmann nor Herr Planck has Given a Definition of W"?. *Astrophysics and Space Science*, n. 290, 2004, p. 241-245.
- HOWARD, D. What makes a classical concept classical? Toward a reconstruction of Niels Bohr's philosophy of physics. In: Faye, J.; FOLSE, H.J. *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 153. Dordrecht: 1994, 201 - 229
- KOJEVNIKOV, A. *The Copenhagen Network The Birth of Quantum Mechanics from a Postdoctoral Perspective*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2020.
- PESSOA JR, O. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- REGT, H. W. Erwin Schrödinger, Anschaulichkeit, and quantum theory. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 28, n. 4, p. 461-481, Dez. 1997,
- REGT, H. W. Spacetime Visualisation and the Intelligibility of Physical Theories. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 32, n. 2, p. 243-265, Jun. 2001.
- RÜDINGER, E.; KALCKAR, J. *Niels Bohr Collected Works: Foundations of Quantum Physics I (1926 - 1932)*. Holanda do Norte: Elsevier Science Publisher B. V., 1985.
- UHLENBECK, G.; GOUDSMIT, S. Spinning Electrons and the Structure of Spectra. *Nature*, n. 117, 1926, p. 264-265.
- VIDEIRA, A. A. P. Boltzmann, física teórica e representação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, 2006, p. 269-280.

Recebido em: 30/05/2022
Aprovado em: 09/12/2022

Rafael Velloso

Doutorando em Filosofia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre em Filosofia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), graduado em Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Possui experiência em Divulgação Científica e Educação/Ensino em Ciências, tendo atuado como bolsista de Iniciação Científica no Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST) e como pesquisador no Instituto Nacional de Comunicação da Ciência e Tecnologia (INCT). Membro do grupo de pesquisa, ensino e extensão Physikos - Estudos em História e Filosofia da Física e da Cosmologia (FACH-

UFMS) e do grupo de pesquisa Estudos Sociais e Conceituais de Ciência, Tecnologia e Sociedade (ECTS) do Departamento de Filosofia da UERJ. Colabora com o projeto de extensão Primavera do Centenário Feyera-bend, da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Realiza estudos na área de Filosofia da Física, com recorte para problemas conceituais em interpretações para a mecânica quântica. Tem experiência em estudos sobre características ontológicas e epistemológicas da interpretação quântica.