

Pode Sustentar-se o Argumento de Que Existe uma Dialéctica Quântica da Natureza?

Lino Machado
Universidade Federal do Espírito
Santo (Ufes)
linomachado36@yahoo.com

Resumo Autores como os físicos Léon Rosenfeld, Gerald Holton e Franco Selleri, bem como o filósofo Miguel Reale perceberam já que, no interior da mecânica quântica, o princípio da complementaridade de Niels Bohr pode ser aproximado à noção filosófica de *dialéctica* (numa perspectiva *não hegeliana*, entretanto). Além de buscar contribuir para robustecer tal linha de interpretação do famoso princípio bohriano, neste *paper* tentaremos compreender *dialecticamente* a relação de Louis de Broglie e a de desigualdade de Werner Heisenberg. Por fim, argumentaremos a favor de um enfoque *realista* do princípio em causa.

Palavras-Chave física quântica; complementaridade; indeterminação; dialéctica; realismo.

DOI 10.1515/kjps-2017-0005

1. Preâmbulo

Gostaríamos de iniciar o presente artigo com palavras de Luís Alcácer, extraídas da sua pormenorizada *Introdução à mecânica quântica*. A citação da passagem do cientista português será algo longa, mas as suas informações abalizadas irão permitir-nos economizar uma parcela considerável de conteúdo adiante valioso para a nossa própria argumentação. Eis as palavras em causa:

O dia 14 de Dezembro de 1900, em que Max Planck formulou publicamente, pela primeira vez, a hipótese quântica, marca o nascimento da mecânica quântica. Foi a ideia

de que a luz era emitida (e absorvida) em quantidades discretas – os *quanta* – que, nas quase três décadas que se seguiram, levaram à formulação de uma das teorias mais fecundas da história da ciência.

Uma das ideias fundamentais [...] da teoria quântica é a de que quer a luz, quer as partículas materiais, como os elétrons, se propagam como ondas, mas têm comportamento de partículas quando interactuam com outras. [...].

Um *quantum* de luz, proveniente de um *laser*, pode ser detectado numa placa fotográfica, onde é absorvido por um átomo de prata. No processo de absorção, comporta-se como uma partícula com energia e momento linear bem definidos, que transfere para o átomo, o qual recua. Entre a fonte onde é emitido (como partícula) e o alvo onde é absorvido, o *quantum* de luz propaga-se como uma onda [...].

Também as partículas de matéria, como os elétrons e os átomos, têm esse comportamento dual – propagam-se como ondas, mas, quando intereactuam com outras, têm também o comportamento típico de partículas. Como partículas em movimento, têm momento linear (p) e como ondas têm comprimento de onda (λ)¹.

Os quatro parágrafos acima trazem uma síntese da chamada dualidade onda–partícula, servindo, portanto, de ponto de partida ao que almejamos defender nas páginas seguintes: **a)** na esteira de outros autores, argumentar que o princípio da complementaridade, de Niels Bohr, que busca dar conta do comportamento dual tanto da luz quanto da matéria, pode ser visto como *dialéctico*; **b)** estender tal interpretação para duas manifestações do formalismo da mecânica quântica: a *relação de Louis de Broglie* e a *relação de incerteza ou indeterminação de Werner Heisenberg*; **c)** desembocar numa leitura *realista* da complementaridade.

¹ Alcácer, 2012, 3.

Para levar adiante os nossos intentos, precisaremos lançar mão de uma série de conceitos: além da *dualidade onda-partícula*, falaremos em *função de onda*, *onda de possibilidade*, *colapso da onda*, *princípio da indeterminação*, *princípio da complementaridade*, *fenômenos intermediários entre onda e partícula* e *distinção aristotélica potencialidade-atualidade*. Tal matriz conceitual será abordada de maneira *sintética*, seletiva ao extremo, com um enquadramento mínimo adequado apenas aos objetivos deste artigo. Com exceção dos fenômenos intermediários, a diacronia em que se inserem as noções mecânico-quânticas mencionadas desdobra-se historicamente, no essencial, de 1900 a 1927, data de consolidação do que passaria a conhecer-se como Escola ou Interpretação de Copenhaga² – embora tal denominação deva haver surgido somente cerca de três anos depois, “no prefácio de um livro escrito por Heisenberg em 1930, *Os princípios físicos da teoria quântica*”³.

2. Parcera do Conceitual Aparato Quântico

Diante do impressivo trecho de Luís Alcácer, mesmo os leitores leigos em mecânica quântica (que trata da realidade nos seus níveis atômicos e subatômicos) terão uma noção razoável, ainda que não mais aprofundada, da dualidade onda–partícula da matéria e da luz.

No que concerne à matéria, há o célebre formalismo de Erwin Schrödinger, que governa a sua faceta ondulatória: a *equação diferencial da função de onda* ψ (apresentada pelo cientista austríaco em 1926). A duplicidade em consideração faz com que, *por um lado*, o aspecto ondulatório de um sistema quântico evolua de maneira “unitária”, ou – nas palavras de Osvaldo Pessoa Jr. – “contínua, linear, determinista e reversível”⁴; *por outro lado*, quando se medir (ou observar) o elemento quântico em questão (por exemplo, a “carga do elétron”), experiência em

² Deixemos claro que a denominação “Escola de Copenhaga” pode ser enganadora, levando-nos ao erro de acreditar numa unidade de pensamento dos cientistas associados à mesma. Para examinar uma boa argumentação de que *não havia tal unidade*, cf. Pinto Neto, 2010, 7–9, 15–17. (A obra deste autor é dedicada às várias versões principais de mecânica quântica, para além do legado do Copenhaga, a que fundamentalmente nos ativemos.)

³ Bezerra and Orsi, 2013, 75 (n. 27).

⁴ Pessoa Jr., 2006, 45.

que ele poderá ser interceptado numa câmara de condensação por meio de uma nuvem de vapor), ocorrerá então o que os cientistas denominam *colapso da função de onda* (ou *redução do vetor de estado*), vale dizer, esta como que se estreitará num ponto, numa localização precisa, o que insere a descontinuidade no terreno da continuidade, de jeito súbito, tanto mais intrigante quanto o colapso *não* é previsto pela própria equação de Schrödinger⁵.

Outra estranheza do nível de realidade que vamos focalizando diz respeito ao *significado físico* das ondas de matéria da equação famosa (que integra a “mecânica ondulatória”, desenvolvida por Schrödinger, na qual se insere a sua equação). Como interpretado por Max Born já em 1926, elas são *ondas de possibilidade*, não algo tangível. Ao exibir um comportamento ondulatório, a matéria atômica e subatômica (“micro” ou “nanomatéria”) revela-se como um conjunto de *possibilidades, superposição ou coexistência de estados ou localizações, informação*, que se encontra não no espaço-tempo quadridimensional (einsteiniano), mas num com mais dimensões, denominado “de configuração” ou “espaço de Hilbert” – em homenagem ao grande matemático que o descobriu fazia muitos anos, sem sonhar que, no futuro, ele seria apropriado para a física quântica!

A partir de Max Born, podemos interpretar a função de onda ψ de modo mais ou menos como o seguinte: tanto as ondas comuns do nosso cotidiano (aquáticas, sonoras) quanto as da micromatéria têm *amplitude* (a qual concerne ao desvio da sua grandeza física relativamente ao estado de repouso). Medem-se as *intensidades* de ambos os tipos de ondas com a *elevação da amplitude ao quadrado*. Aqui, entretanto, algo inesperado ocorre, como elucida Nick Herbert: “Para todas as ondas, *exceto as quânticas*, a *intensidade* dá a medida da quantidade de energia transportada pela onda em cada ponto. As ondas quânticas não transportam energia [...]. A intensidade (amplitude elevada ao quadrado) da onda quântica é uma *medida de probabilidade*”⁶. Ainda: “Para uma onda

⁵ Nas palavras de Marcelo Gleiser: “Dizemos que a função de onda ‘colapsa’ [...]. Segundo um mecanismo que permanece obscuro [...], a detecção ‘seleciona’ uma determinada posição para o elétron [ou outra partícula que se estiver medindo]” (Gleiser, 2014, 225).

⁶ Herbert, 1989, 95: destaque nossos.

quântica, o quadrado da sua amplitude (no local x) representa *não energia*, mas a *probabilidade* de que uma partícula – um pacote de energia localizada – será *observada* caso um detector esteja posicionado no local x ⁷. O físico norte-americano frisa bem que ψ (ou tão só a função de onda) é uma onda de *possibilidade*, enquanto ψ elevada ao quadrado é uma onda de *probabilidade*, “sendo a possibilidade, de algum modo, menos real do que a probabilidade”⁸.

Assim explica Luís Alcácer a situação, ressaltando a importância da *medição* no processo: “A função de onda, ψ , [...] só tem *significado físico definido*, na medida em que se atribui um significado ao *quadrado do seu módulo*. Em rigor, apenas se pode atribuir significados físicos a resultados de medições [...]”⁹. Embora não distinguindo entre “possibilidade” e “probabilidade”, Richard Feynman também destaca que a amplitude de uma onda quântica traz informação diversa da de uma onda comum: “Ela [amplitude] descreve o quê? Não a energia de uma onda, mas a probabilidade de chegada dessas unidades [elétrons, no caso]”¹⁰.

Prossigamos. A natureza probabilística do reino quântico¹¹ induziria a uma nova descoberta, em 1927: o *princípio da incerteza ou indeterminação* de Heisenberg. Matematicamente, o princípio citado revela: ao contrário do que ocorre no âmbito da física clássica (apropriada ao conhecimento dos objetos maiores do universo), ao conseguirmos obter de maneira mais precisa (o que é exequível) a *posição* de uma partícula, perdemos a precisão no que diz respeito ao seu *momentum* (quantidade de movimento), e vice-versa, *não importa qual for o aparato de medição usado*. Tal princípio é válido para todas as demais *grandezas conjugadas* (ou *pares de observáveis*) da esfera quântica, como *tempo* e *energia*, pois, segundo o que ele patenteia, nunca seríamos capazes

7 Herbert, 1989, 122: dest. nos.

8 Herbert, 1989, 122.

9 Alcácer, 2012, 5 (n. 1); cf. também 74 (n. 1).

10 Feynman, 2012, 143.

11 A física clássica, sobretudo com a contribuição de Pierre-Simon Laplace, também pode lidar com probabilidades, mas, em casos de moedas, dados jogados, etc., isto será “somente uma maneira de quantificarmos a nossa ignorância”, ao passo que, em mecânica quântica, o probabilismo, “com a interpretação de Born, é *intrínseco* ao problema” (Oliveira, 2010, 91).

de obter, *em simultâneo*, o valor mais exato de tais grandezas em jogo: informação efetiva acerca de uma delas acarreta vaga informação acerca da outra, conjugada¹². Trata-se de uma condição imposta pela natureza mesma, não pela nossa veleidade de intervir nela.

Ainda em 1927, antes de tomar conhecimento da indeterminação heisenbergiana, Niels Bohr ideou o seu próprio princípio, com o intuito de dar conta das estranhezas associadas à dualidade onda–partícula: o da *complementaridade*. Este se deixa sintetizar em termos como os de Osvaldo Pessoa Jr.: “Um fenômeno não pode ser ao mesmo tempo ondulatório e corporcular”¹³. Ou em uma das diversas formulações do próprio Bohr: “[...] os dados obtidos em diferentes condições experimentais não podem ser compreendidos dentro de um quadro único, mas devem ser considerados *complementares*, no sentido de que só a totalidade dos fenômenos esgota as informações possíveis sobre os objetos”¹⁴.

Para além dos debates filosóficos que, com a indeterminação de Heisenberg, a complementaridade bohriana suscitou, esta ainda passaria por um desdobramento científico inusitado, décadas depois. Em 1979, William Wootters e Wojciech Zurek começaram teoricamente “a mostrar que há fenômenos *intermediários*” entre onda e partícula, o que não deixou de surpreender¹⁵. Quando tais fenômenos foram confirmados, entretanto, notou-se que a complementaridade de Bohr não era, de facto, infirmada por tais “fenômenos intermediários”. Osvaldo Pessoa Jr. abordou esse acréscimo conceitual à chamada Interpretação de Copenhaga, de modo a deixar claro que a visão complementar não perdia validade – tão só tornava-se mais sutil, manifestando-se de feição parcial:

À primeira vista, a existência de *fenômenos intermediários* parece ser um problema para a interpretação da complementaridade, para a qual onda e partícula são “aspectos

¹² Conectando Schrödinger com Heisenberg: “[...] uma função de onda [...] contém toda a informação que o princípio da incerteza permite que tenhamos a respeito da partícula associada” (Eisberg and Resnick, 1979, 183: dest. nos.).

¹³ Pessoa Jr., 2006, 31.

¹⁴ Bohr, 2008, 51. Ao longo dos anos, Niels Bohr apresentou ao menos três espécies de complementaridade (cf. Pessoa Jr., 2006, 93–95). Referimo-nos à mais célebre delas.

¹⁵ Cf. Pessoa Jr., 2006, 114: dest. nos.

complementares, mas mutuamente excludentes, da descrição". Porém, mostra-se que para *cada fenômeno intermediário* existe um *outro* que lhe é complementar. Enfim, o fato de um fenômeno nunca exibir simultaneamente os dois aspectos *de maneira total* não implica que tais fenômenos não possam aparecer de maneira "parcial"¹⁶.

Vamos agora ao derradeiro item que, à frente, será retomado em nossa reiteração da existência de uma dialéctica no coração da complementaridade de Bohr. Heisenberg volta à cena: agora, como o autor de *Física e filosofia*, publicado na década de 1950. Nesta obra de título tão sintomático e, ao mesmo tempo, tão "natural" (se nos recordarmos dos pensadores gregos da *physis* e da expressão "filosofia natural", que nomeou por muito tempo a física, inclusive o célebre volume de Newton *Philosophiae naturalis principia mathematica*, de 1667), o cientista alemão julgou ter percebido similitudes razoáveis entre a dualidade onda-partícula e o velho par aristotélico *dynamis* (ou *potentia*) e *enérgeia* (ato, processo), entre outras noções do Estagirita.

Três passagens da obra de Heisenberg atestam os paralelos por ele efetuados:

[...] A onda de probabilidade [...] correspondia a uma tendência para alguma coisa. Tratava-se, assim, de uma versão quantitativa do velho conceito de potência da filosofia aristotélica, que introduzia algo entre a ideia de evento e o evento real, um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade.

[...] a função de probabilidade combina em si elementos objetivos e subjetivos. Ela contém asserções sobre possibilidades ou tendências mais propícias (*potentia*, na filosofia aristotélica) e tais assertivas são completamente objetivas, por não dependerem de observador algum; ademais, contém ela afirmações acerca de nosso conhecimento do

16 Pessoa Jr., 2006, 113: dest. nos.

sistema que, é claro, são subjetivas no sentido de poderem diferir de um experimentador a outro.

[...] Se compararmos essa situação com os conceitos aristotélicos sobre matéria e forma, poderemos dizer que a matéria, em Aristóteles, como mera *potentia*, deveria ser comparada ao presente conceito de energia, que passa ao “real” após adquirir forma no momento em que se cria a partícula elementar¹⁷.

Por causa das passagens acima, Osvaldo Pessoa Jr. fez o seguinte comentário, nos seus *Conceitos de física quântica*: “Heisenberg desenvolveu, nos anos 50, uma interpretação que enfatizava alguns *pontos não desenvolvidos por Bohr*. [...] Heisenberg passou a sustentar que a função de onda [...] exprime uma *potencialidade*, no sentido aristotélico, relacionada a uma *propriedade “objetiva”* que *independe do estado de conhecimento do observador*”¹⁸. Tal reflexão sobre a objetividade – presente no Heisenberg pós-copenhaguista – acarreta a problemática do *realismo*, pressuposta no título deste artigo (na expressão “... da natureza”), mas em geral não associada à Escola de Copenhaga.

Decerto, uma observação se faz aqui obrigatória: óbvio que a teoriização aristotélica acerca do par atualidade–potencialidade *não* poderia antecipar a tão estranha dualidade onda–partícula (da matéria e da luz) da mecânica quântica; todavia, Heisenberg a retomou, apesar das *diferenças conceituais*, passíveis de distinção, entre as noções do par e as da dualidade em questão. Ele o fez não pretendendo importar a completa metafísica do Estagirita, mas concentrando-se no fundamental dela que lhe interessava, com o propósito de fornecer inteligibilidade ao que, na mesma mecânica, se afigurava contra–intuitivo (ou de difícil visualização mental). A consciência disto é necessária, para o entendimento de parcela significativa do que discutiremos adiante.

17 Heisenberg, 1999, 61, 78–79 e 222–223, respectivamente. Note–se que, nas citações de Heisenberg acerca de Aristóteles, não aparece uma clara referência a ato (*enérgeia, entelékhia*). Tal noção, entretanto, está ali implícita, conceitualmente pressuposta, pois a noção de potencialidade (*dynamis*) a implica.

18 Pessoa Jr., 2006, 96: dest. nos.

No final do nosso trabalho (nas cerca de duas páginas da seção 5), abraçaremos a postura realista de maneira explícita, na companhia de outros estudiosos. Agora, após trazer à baila pequena parte do legado associado, de um jeito ou de outro, à dita Escola de Copenhaga, encararemos o complexo tópico da dialéctica.

3. Complementaridade e Certa Dialectização Filosófica

“Onda” e “partícula”: por um lado, concepções *não* aplicáveis aos mesmos objetos na física clássica; por outro, noções transformadas numa *dualidade conceitual complexa*, nas versões da mecânica quântica associadas à interpretação de Copenhaga, quando do tratamento do mundo atômico e subatômico. É, pois, legítimo perguntar: será este micro-domínio do real *intrinsecamente contraditório*, o que o aproximaria do manuseio *moderno* da dialéctica na filosofia idealista de Hegel e seguidores (entre os quais, não sem polêmicas com o idealismo hegeliano, o materialista Engels de *Anti-Dühring* e *A dialéctica da natureza* mais o Marx de certos *Manuscritos matemáticos*, em meio a textos diversos)?

Ao que tudo indica, a resposta à indagação acima revela-se *negativa*. Aos poucos, vejamos as razões de ela ser assim e, em conjunto, podemos observar *positivamente* como certo modo dialéctico *antigo* de considerar a realidade é, em dosagem razoável, congruente com a dualidade quântica, ou esta com aquele. Isto na perspectiva de *assumirmos* o princípio da complementaridade de Niels Bohr, que buscou dar conta da difícil diáde onda-corpúsculo, na intimidade recôndita da matéria e da energia: a versão complementar segundo a qual um fenômeno quântico “não pode ser *ao mesmo tempo* ondulatório e corpuscular”¹⁹.

Dado que existem tradições de encarar dialecticamente *ou* apenas o pensamento *ou* este e o real – como no hegelianismo e seus herdeiros –, não nos parece que a problemática presente seja ociosa, “bizantina”, irrelevante nos arraiais científicos. Aliás, logo veremos que ela surge no quantismo, ou em torno dele. Vamos ao seu encontro, portanto.

19 Pessoa Jr., 2006, 31: dest. nos.

No artigo “As raízes da complementaridade”, de Gerald Holton, encontramos a informação seguinte, concernente a um “ traço característico” do cientista dinamarquês:

[...] Refiro-me ao conhecido *estilo dialéctico* de Bohr de pensar e de trabalhar. Um daqueles que trabalharam com ele por mais tempo, Léon Rosenfeld, atesta que o início da reflexão de Bohr era *essencialmente dialéctico*, mais do que reflexivo... Ele necessitava do estímulo de alguma forma de *diálogo* para iniciar seu pensamento. Rosenfeld também recorda um conhecido aforismo de Bohr: “Toda sentença que eu falo deve ser considerada não como uma afirmação, mas como uma *pergunta*”²⁰.

“Dialéctica”, “diálogo”: talvez Bohr tenha sido como que um *Sócrates da física do século XX*, se recordarmos o indagante pensador da antiguidade, o qual, precisamente nos diálogos platônicos, via de regra exibia um modo de filosofar que não dispensava o recurso a perguntas, cada vez mais pormenorizadas, dirigidas a este ou aquele interlocutor, a respeito de determinado assunto: por exemplo, inquirir o que é a piedade²¹. Em *Contradição e dialéctica nos antigos e nos modernos*, Enrico Berti assinala que, diante dos seus debatedores, Sócrates se valia da contradição como “reveladora de uma *posição insustentável ao pensamento* e, portanto, da admissão, ao menos *implícita*, do *princípio da não contradição*”²² – princípio, aliás, que viria a ser explicitado por Aristóteles, mormente na sua *Metafísica* (Livro IV 3, 1005b 19–20): “É impossível que a mesma coisa (*tò autó*) pertença (*hypárkhsein*) e não pertença ao mesmo tempo (*hamá*) à mesma coisa (*tōi autōi*) e sob o mesmo aspecto (*katà tò autó*)”²³.

20 Holton, 1984, 66: dest. nos.

21 Bohr, quem sabe um “Sócrates da física”, mas que precisou enfrentar, ao longo das décadas, um adversário bem mais poderoso que os do personagem histórico-filosófico dos textos de Platão: referimo-nos, naturalmente, a Einstein, cujas polêmicas com Bohr e a Escola de Copenhaga, sobre o realismo e, sobretudo, o caráter indeterminístico dos *quanta*, entraram para a história da ciência.

22 Berti, 2013, 101: dest. nos.

23 Apud Berti, 2013, 155–156.

Quanto ao procedimento socrático, este seria “a forma especificamente grega da dialéctica”²⁴, sem prejuízo de considerarmos outros manejos helênicos desta última, nas mãos argutas de filósofos como Zenão, Heráclito, os sofistas, etc., mesmo vários deles não recorrendo, em suas reflexões, ao signo *polissêmico* em foco (ou, para nós, vocábulo historicamente *sobre carregado de sentidos*). Deste jeito mais socrático de raciocínio (*não autoconflitante*), o bohriano princípio da complementaridade *não* será divergente, porque, no terreno quântico, o “estudo dos fenômenos complementares requer arranjos experimentais *mutuamente excludentes*”, nas palavras, por seu lado *inambíguas*, do cientista dinamarquês²⁵. Tais palavras indicam que, se as noções de onda e partícula são bem diversas uma da outra, elas *não* se manifestam *de uma só vez de todo ou juntas assim*, no âmbito da microfísica, ou seja, *em interpretação (ontológica) que corre por nossa conta*, nele a natureza *não é intrinsecamente contraditória*: ora o aspecto ondulatório é exibido, ora o corpuscular – mesmo considerando-se os *fenômenos intermediários envolvendo onda e partícula*, do ano 1979 em diante. Afinal, *cada manifestação* dos ditos fenômenos acarreta que exista um “outro que *lhe é complementar*”, surgindo apenas “de maneira ‘parcial’”²⁶. Comportamento maleável da complementaridade, mas *não a sua negação*, portanto. Também comportamento maleável da microfísica, mas *não autocontraditório*, por conseguinte. Em geral, os cientistas são explícitos a respeito desses pontos, como, por exemplo, o faz o físico-químico Eduardo Hollauer: a luz e a matéria devem ser vistas ora como onda, ora como corpúsculo, “sem que a isso seja subentendida *qualquer contradição de natureza lógica ou física*”²⁷. De resto, já em “O postulado quântico e o recente desenvolvimento da teoria atômica”, de 1927–28, o próprio Bohr deixara claríssimo tal detalhe: “De fato, estamos aqui [...] *não tratando de representações contraditórias* dos fenômenos, mas de *representações complementares* [...]”²⁸. Parece, então, que o célebre

24 Berti, 2013, 101.

25 Bohr, 2008, 52: dest. nos.

26 Pessoa Jr., 2006, 113: dest. nos.

27 Hollauer, 2008, 52: dest. nos.

28 Bohr, 2000, 138: dest. nos.

princípio de Bohr é compatível com a tradição filosófica ocidental de Sócrates, Platão e, sobretudo, Aristóteles, não apenas com o legado do *yin-yang*, que o físico foi buscar para o seu brasão, quando do (justo) recebimento da dinamarquesa Ordem do Elefante, em 1947. Deveras, aqui os “contrários são complementares” (“*Contraria sunt complementa*”), não sendo contraditórios.

Saltando momentaneamente sobre as cabeças de centúrias de reflexão, notemos que outra motivação possível para a complementaridade – ou não contraditoriedade entre onda e partícula – foi a “dialéctica qualitativa” apresentada no século XIX por Kierkegaard, o pensador da Dinamarca que, justamente, desafiava o hegelianismo, em cujo sistema de ideias a concepção de contradição foi *introjetada no tecido mesmo da realidade*, para além (ou aquém) da sua irrupção eventual no pensamento e no agir humanos. Kierkegaard reservou a sua própria dialéctica para os casos em que, segundo a óptica que lhe era peculiar, um par de antinomias (“tese” e “antítese”) *não* se veria superado pelo estágio ou movimento de “síntese”, atribuída sempre, *com enorme exagero*, ao pensador alemão. Aqui, o leitor interessado poderá compulsar o citado artigo de Gerald Holton sobre “As raízes da complementaridade”²⁹, trabalho que, ademais, fazendo jus ao nome, ainda apresenta *outras influências filosóficas* para a constituição do princípio de Bohr: Poul Martin Møller, William James, Harald Höffding – este último, autor do volume *Kierkegaard como filósofo*³⁰.

Tampouco deve ficar sem menção o texto do físico Franco Selleri “Complementaridade e/ou teoria quântica”³¹, o qual, por sua vez, enviamos ao título de Max Jammer *The conceptual development of quantic mechanics*, a respeito do influxo kierkegaardiano no cientista dinamarquês. Selleri não deixa de ressaltar: “Bohr não pode ser considerado propriamente um Hegeliano”³². Supomos até que, ao menos em termos da complementaridade, o advérbio “propriamente” deva ser *eliminado* da afirmativa de Selleri. Supomos também que estas fortes referências, às

29 Holton, 1984, 64–66.

30 Holton, 1984, 64.

31 Selleri, 1997, 13–29, esp. 26–29.

32 Selleri, 1997, 26.

quais outras poderiam ser acrescidas, já indicam a pertinência do tópico atual no legado de Bohr. Apontemos mais um caso de consideração da complementaridade bohriana em *termos dialécticos não hegelianos*: o artigo “Variações sobre a dialéctica”, de Miguel Reale³³. Nele o filósofo e jurista brasileiro se refere à complementaridade bohriana como uma “dialéctica de implicação e polaridade”, diversa do “modelo hegeliano ou marxista”. (Não almejamos, pois, fingir a “descoberta” do assunto, tão só *enfoque diferente* deste, se tal for possível.)³⁴

Retornemos, todavia, à órbita intelectual do mundo helênico, antes sobrevoado. Dada a importância que os pensadores gregos acima aludidos assumirão neste artigo, reservemos algumas palavras para indicar a importância que o assunto em foco teve nas produções deles como um todo.

Notório que, na obra de Platão, a dialéctica envolve o diálogo, a discussão e a disputa a respeito deste ou daquele tema. Em textos coerentemente escritos na forma dialogal, nos quais Sócrates é o personagem inquisidor por excelência, Platão desenvolveu a dialéctica em feição “ascensional” (do terreno do sensível ao do inteligível) ou como uma via de dedução discursiva de formas que ele considerava arquetípicas. Segundo André Lalande, para o pensador, o procedimento dialéctico – levado a cabo através da “arte de dividir as coisas em gêneros e espécies” – permitia “remontar de conceitos em conceitos, de proposições em proposições, até os conceitos mais gerais e os primeiros princípios que têm para ele [Platão] *valor ontológico* (*Rep.*, 533 E-534-B; *Filebo*, 57-58)”³⁵. Falando com torneio imagístico, encontramo-nos aqui com os pés na escadaria da metafísica do filósofo. Assim, a dialéctica é algo que, de facto, ele viu como um instrumento útil ao conhecimento do real.

Aristóteles também valorizou a postura dialéctica (ou o “silogismo dialéctico”, analisado nos *Tópicos*), embora *diferenciasse tal postura de uma prática que conduzisse ao conhecimento de modo que ele considerava mais seguro* (ou o “silogismo demonstrativo”, “científico”, estu-

33 www.miguelreale.com.br/artigos/vdialetica.htm. Accessed 27 May 2016.

34 Adiante, trataremos de “Da mecânica quântica à filosofia”, de Ramiro Délio Borges de Meneses, com a sua *terminologia hegeliana* (Meneses, 2008, 78 e 96).

35 Lalande, 1993, 254: dest. nos.

dado nos *Analíticos posteriores*) da realidade. No embate de opinião diversas, Aristóteles enxergou na dialéctica um dos procedimentos para, perante os debatedores, sustentar a defesa da concepção do ser como múltiplo (algo já presente em Socrátes e Platão, conforme mais abaixo notaremos), sem, todavia, deixar-se enredar em armadilhas verbais, raciocínios falaciosos, por certo decorrentes do facto de que a referida dialéctica acarreta muitas vezes a disputa discursiva das ideias. De facto, Aristóteles dedicou uma obra (*Refutações sofísticas*) ao desmonte das argúcias linguísticas de que os sofistas e outros se valiam, diante dos seus adversários, na arena das discussões. Assim, com o seu minucioso estilo próprio, ele deu sequência à crítica socrático-platônica da corrente sofística. Tampouco reste sem destaque que por igual se topa, na vasta produção do Estagirita, em relação à dialéctica, com “um sentido pejorativo [dela]: sutilezas, distinções engenhosas e inúteis [...]”³⁶. Deveras *ambígua* a nossa noção – talvez pouco ficando a dever, em termos de valorações *contrastantes*, ao vocábulo “metafísica”, na história multisecular do pensamento! diante

Por sumários que sejam os dois parágrafos anteriores, deles podemos destacar que, cada um a seu jeito, tanto Platão (com Sócrates como mentor) quanto Aristóteles estimaram a dialéctica, na busca de intelecção do mundo, intelecção que, exatamente, encarou este último como *não unívoco*, segundo agora abordaremos.

Das páginas do trabalho decisivo de Enrico Berti (aceitando vários dos seus pontos de vista), iremos extrair um factor *de alcance ontológico*: na verdade, uma dicotomia (nada bohriamente complementar) compreendendo a visão do ser como “unívoco” ou “multívoco”. Frisando: a segunda foi a perspectiva de Platão, do seu mestre Sócrates e do seu ex-aluno Aristóteles, perspectiva que se nos afigura a *adequada para a dualidade onda-partícula*.

De acordo com o livro do estudioso italiano, um modo de os três filósofos gregos escaparem da proliferação de contradições (ou *antilogias*) nas entranhas da realidade foi o seguinte: *evitar* “entender o ser num

36 Lalande, 1993, 255.

único sentido, ou seja, como noção unívoca”³⁷. Esta seria uma maneira de não cair em armadilhas conceituais (aporias linguísticas), geradas ao, por exemplo, eleger-se apenas a imobilidade dos entes ou, ao contrário, a sua pura mobilidade, como explicação derradeira do cosmo³⁸. Segundo Berti, vejamos o autor de *A república* tratando noções contrárias como não contraditórias, no seu diálogo *Parmênides*:

[...] De fato, Platão faz Sócrates afirmar que os entes são semelhantes porque participam do gênero da semelhança e dessemelhantes porque participam do gênero da dessemelhança, o que *não é de modo algum contraditório* e, portanto, impossível. Se o semelhante enquanto tal fosse dessemelhante e o dessemelhante enquanto tal fosse semelhante, isso seria monstruoso [...], mas não há nada de estranho no fato de que uma mesma coisa seja semelhante enquanto participa do semelhante e dessemelhante enquanto participa do dessemelhante, ou que seja una enquanto participa do uno e múltipla enquanto participa do múltiplo, ou por fim, que seja estática enquanto participa do estático e em movimento enquanto participa do movimento. Aqui [...], Platão distingue o juízo de identidade do juízo de atribuição [...], que lhe possibilita admitir como uma mesma coisa pode ter *predicados diversos e até opostos entre si*³⁹.

Por sua vez, o autor explícito do princípio da não contradição, o Estagirita, irá contrapor-se assim aos defensores da tese da univocidade das coisas (concepção, reiteramos, geradora de paradoxos, porquanto incapaz de lidar com os *aspectos múltiplos do real*, ou a sua *complexidade intrínseca*, a não ser negando, por meio de contorcionismos verbais, a existência deste ou daquele dos seus “predicados”):

37 Berti, 2013, 21.

38 No seu *O que é dialética*, Leandro Konder também destaca a importância da aristotélica dicotomia *potência e ato* para a “sobrevivência da dialética” (Konder, 2014, 10).

39 Berti, 2013, 41: dest. nos.

[...] De fato, Aristóteles lhes responderá que o *ser se diz em dois sentidos*, em *potência* e em *ato*, e que “é possível que algo derive do não ser”, entendido como ser em potência, assim como “é possível que a mesma coisa seja e não seja, mas não segundo o mesmo [...]: de fato, é possível que a mesma coisa seja, ao mesmo tempo, os contrários em potência, mas não em ato”⁴⁰.

“Potência” (*dynamis*) e “ato” (*enérgeia, entelékhēia*): neste passo, reencontramos o Aristóteles que, vários séculos depois, viria a inspirar o Heisenberg de *Física e filosofia*, ou seja, o cientista alemão que enxergaria nas duas (*não antagônicas*) noções do pensador grego algo importante para a compreensão da dualidade onda–partícula. Sabemos que o forjador do princípio da indeterminação aproximou a primeira delas – “o velho conceito de *potência* da filosofia aristotélica” – à “onda de probabilidade” da física dos *quanta*, onda que, então, poderia ser considerada “uma versão *quantitativa*” da citada (e *qualitativa*) potência ou *dynamis*⁴¹.

Eis um detalhe merece atenção: as mesmas noções de potência e ato – que, para o criador do princípio da indeterminação, pareceram consistentes com a função de onda e o seu colapso – parecem congruir por igual com a complementaridade bohriana. Seria, aliás, muito estranho (até contraditório!) se assim não fosse, na perspectiva da herança de Copenhaga, dada a relevância do princípio de Bohr na versão científica desta⁴²... Parafraseando o aristotelismo, afirmemos que *o ser (quântico) se diz em dois sentidos (complementares): potencialmente, como onda; detectado em alguma atualidade, como partícula.*

40 Berti, 2013, 74: dest. nos.

41 Heisenberg, 1999, 61: dest. nos. Além de, na *Metafísica*, enxergar o ser como “ato” e “potência”, Aristóteles o definiu também enquanto “categoria” (ou ser em si), “acidente” e “verdadeiro” (e o não-ser como “falso”).

42 Sabe-se que também o filósofo de lena se valeu do “conceito de potencialidade”, como recorda Carlo Bussola: “Segundo a lógica de Hegel, o mundo real é essencialmente um *mundo potencial*, isto é, em contínua mudança, e portanto é um mundo aberto para o infinito, pois não há limite para a *potencialidade*” (Bussola, 1994, 31). Tal retomada da herança aristotélica da noção de potência se dá no interior de uma filosofia que, porém, como a hegeliana, não poucas vezes desafiou o aristotélico princípio da não contradição. Assim, ela não será compatível com a complementaridade de Bohr, que não viola o aludido princípio.

Sintomático que, tratando das contradição e dialéctica na filosofia antiga e moderna, o texto de Enrico Berti não deixe de fazer *menções ao quantismo*. Na obra aludida, aparecem ao menos três referências ao terreno atômico e subatômico: **a)** “contradições [sic] da física quântica”, envolvendo “teoria corpuscular” e “teoria ondulatória”; **b)** “antinomias da teoria dos conjuntos e da física quântica”; **c)** “contradições [sic] da física quântica”⁴³.

Supomos que, de facto, a complementaridade de Bohr ajude a mostrar que tais contradições não existem, embora a dita complementaridade possa (e até deva) ser considerada *dialecticamente*, pois – retomando Sócrates, Platão e Aristóteles⁴⁴ e remetendo-os ao domínio quântico – *nada parece ser mais “multívoco” do que a dualidade onda-partícula*, aliás, a própria faceta ondulatória da matéria e da energia já o é, caso recordemos a *superposição de informações que existe na função de onda*, superposição que apenas se desfaz por meio do colapso (ou redução de estado), causado pela observação de um ser senciente, ou pela *ação do meio ambiente* (o fenômeno da *descoerência*, difícil conquista pós-Copenhaga, de Dieter Zeh, Wojciech Zurek, Anthony Leggett e Amir Caldeira⁴⁵). Lembremos de novo que a função de onda e o seu colapsar implicam duas conceituações opostas, mas não contraditórias (pois *não* atuam em conjunto, em simultâneo ou concomitância): respectivamente, a do *contínuo* e a do *descontínuo*⁴⁶.

O princípio bohriano é dialéctico porque nos induz a lidar *não contraditoriamente* com os aspectos ondulatório e corpuscular da matéria e da energia, quanticamente consideradas. Mais: trata-se de uma *dialéctica*

43 Berti, 2013, 410, 412 e 421, respect.

44 Para evitar mal entendidos, sublinhemos: tais retomadas *never* devem pressupor correspondências ponto a ponto, mas tão só paralelos razoáveis, como foi o caso do intentado por Heisenberg, ao rever a mecânica quântica em termos de Aristóteles.

45 Luís Alcácer chega a afirmar: “A mudança mais importante [no legado da Escola de Copenhaga] ocorreu no período de 1975 a 1982, com a descoberta e compreensão do efeito de *descoerência*, que é responsável por *destruir as sobreposições lineares associadas a várias propriedades macroscópicas*” (Alcácer, 2012, 105: dest. nos.).

46 Sintomático que, na altura de 1931, no âmbito do Instituto de Matemática e Mecânica de Moscou, o cientista e literato François Le Lionnais tenha falado sobre a “Busca de uma *síntese entre o contínuo e o descontínuo*, síntese essa que os progressos recentes na *Mecânica Quântica* tornam cada vez mais necessária” (apud Machado, 2013, 141–142: dest. nos.).

específica (a qual podemos chamar de “bohriana”, em homenagem ao físico de Copenhaga), *específica dialéctica* que, em consonância considerável com dialectizações do passado das filosofias ocidental e oriental, nos leva a perceber que as facetas quânticas corpuscular e ondulatória precisamente não são contraditórias, mas complementares, dependentes dos arranjos experimentais para medi-las e da ação da descoerência. Não há, portanto, congruência da complementaridade com um aspecto fundamental de uma reflexão especulativa como a de Hegel, o homem que, na aurora do século XIX, ousou escrever: “A contradição é a regra do verdadeiro, a não contradição a do falso”⁴⁷. Mais do que mera formulação de efeito, jogando com *antíteses linguísticas*, a passagem citada condensa um item fundamental da lógica postulada pelo seu autor – e, segundo acreditamos, de nada adiantaria buscar aproximar o teor da formulação às estranhezas do quantismo, pois o caráter não poucas vezes contra-intuitivo deste é de outra natureza, não internamente conflitante, quando abordado mais de perto.

Se quisermos confirmar o quanto o filósofo alemão estendia a aplicação do conceito de contradição na sua metafísica, leiamos o que o seu competente defensor Vittorio Hösle afirma (aliás, citando reveladoras passagens do próprio pensador):

[...] Hegel defende a concepção, certamente insólita, de que não apenas teorias, mas categorias lógicas e objetos reais do mundo natural e espiritual se contradizem, e de que (*quase*) *tudo que existe se contradiz*. Na recensão ao texto sobre o realismo ideal de Ohlet, discípulo de Herbart, na qual este, entre outras coisas, havia declarado que algo contraditório não poderia existir, Hegel contesta: “O Senhor Autor deveria ser proclamado um felizardo por jamais lhe terem ocorrido contradições no mundo, na natureza, e nos feitos e no pensar das pessoas, por jamais lhe terem

⁴⁷ Hegel, 1990, 98. Em latim: “*Contradiccio est regula veris, non contradictio, falsi*”. Segundo Enrico Berti, com esta frase de 1801, podemos “afirmar que a nova concepção tipicamente moderna da contradição e da dialética [...] entra oficialmente na história do pensamento” (Berti, 2013, 267: dest. nos.). Esta valorização da contradição pelo jovem Hegel não será desmentida por ele na maturidade.

ocorrido existências que se contradizem a si mesmas, mas em geral todo Ser e pensamento finito é uma contradição [...]. O Senhor Autor [...] deixou-se persuadir por um palavrório didático a assumir cegamente a mais inverídica das suposições, a de que na natureza e na consciência não haveria contradições”⁴⁸.

De facto, seria difícil ver consistência entre tal espécie de reflexão e a bohriana em causa. Neste passo da nossa argumentação, todavia, uma múltipla advertência se faz imperiosa.

No presente artigo, quando nos referi(r)mos à dialéctica de Hegel e dos que, como Marx, Engels e seguidores, lançaram mão de tal legado, sejam feitas as justiças seguintes: **a)** os três filósofos elencados (sobretudo os dois últimos) *não* pensaram (e defenderam) a noção de contradição dialéctica em termos de estrita lógica formal (onde se busca mesmo evitar a presença das contradições em geral); **b)** os citados autores (mormente Marx e Engels, de novo) buscaram escapar de certa “reificação” ou “absolutização” do princípio da não contradição (risco que corre qualquer conceito importante, não só filosófico, como também científico, artístico, ético, religioso, etc.); **c)** a problemática da contradição não nos parece dispensável quando se pensa, ao invés do restrito mundo natural (objecto das físicas clássica e quântica, da química, etc.), na psique não raro carregada de conflitos dos seres humanos e das sociedades que eles criaram e criam (para o conhecimento das quais já o idealismo de Hegel contou bastante, vendo o palco histórico sob a ação do *tempo*, com a sua noção de *processo*, legada aos sucessores, que tanto o veneraram quando o tomaram como alvo de críticas, progressistas ou outras).

Feitas tais advertências ou justiças múltiplas, passemos ao registro do seguinte: em páginas do artigo “Da mecânica quântica à filosofia”, Ramiro Délio Borges de Meneses elaborou uma interpretação do princípio de Bohr em termos dialecticamente hegelianos. No seu teatro conceitual, a partícula faz o papel de tese; a onda representa a antítese; cabe à “partícula-onda” (como ele escreve, seguindo De Broglie) atuar como

48 Hösle, 2007, 191-192.

síntese⁴⁹. Paralelo adicional entre a complementaridade e o hegelianismo se evidencia páginas adiante, no mesmo trabalho: partícula outra vez como tese, onda de novo como antítese, mas – homologia inédita – o “quantião” como síntese⁵⁰. A “tradução” da noção do físico dinamarquês para a conceptualidade do filósofo de Iena soa sugestiva, provocante; todavia, ela parece conter um problema: o de eliminar a força da contradição (que é requerida em Hegel e evitada em Bohr⁵¹) do seu resultado. Assim, se não nos equivocamos, mantém-se a perspectiva triádica do pensador oitocentista no trabalho, ao preço de *não conservar-se um dos seus motores mais fundamentais*: a citada (e problemática) figura da contradição, tal como ele a meditou⁵².

Por nosso lado, acreditamos não ser absurdo observar na dualidade onda–partícula e na compreensão desta por meio da complementaridade de Bohr algo como uma *dialéctica quântica da natureza*, não hegeliana⁵³ – não associada a *tese, antítese, síntese*, termos fichtianos, aliás, *pouquíssimo utilizados por Hegel*, que preferia terminologias como “entendimento”, “razão dialéctica ou negativa” e “especulação ou razão positiva”, etc.⁵⁴.

Dialéctica quântica no seguinte sentido: *onda* não é uma “contradição” de *partícula* (e vice-versa), mas, no nível atômico e subatômico, envolvendo agora as *grandezas conjugadas do princípio de Heisenberg*, o aspecto corpuscular e o aspecto ondulatório da matéria e da energia

49 Meneses, 2008, 78.

50 Meneses, 2008, 96.

51 O autor do artigo citado tem consciência disso: cf. Meneses, 2008, 91–94, 98, 111 e 125.

52 Aos nossos olhos, na interpretação de Meneses a antítese-onda não se comporta como uma *verdadeira contradição* em relação à tese-partícula. De Hegel resta aqui a terminologia triádica, mas não o peculiar funcionamento que ele impôs à mesma.

53 Tampouco a de Friedrich Engels, o qual quis entender a realidade físico-química em termos de dialéctica hegeliana (ainda que revista pela ótica materialista que era a sua e a do autor de *O capital*). O célebre colaborador de Marx valeu-se, por exemplo, da tríade das “leis estabelecidas por Hegel”, a saber: “1) A lei da transformação da quantidade em qualidade e vice-versa. // 2) A lei da interpenetração dos contrários. // 3) A lei da negação da negação” (Engels, 1976, 34).

54 Cf. Ferreira in: Hegel, 1990, 102. Com terminologia ligeiramente diversa, na *Encyclopédia das ciências filosóficas em epitome*, de 1830, o filósofo fala dos três aspectos ou “momentos de todo o lógico-real”, a saber: “α) o abstracto ou intelectual; β) o dialéctico ou negativo-racional; γ) o especulativo ou positivo-racional” (Hegel, 1988, 134, parágr 79).

implicam grandezas (posição e *momentum*, por exemplo) que – *não sendo contraditórias* – são, entretanto, *contrárias, ou assim se comportam, quando das suas medições*: se a posição for mensurada de modo muito *preciso* (o que é possível), o *momentum* se tornará altamente *impreciso*. Aí está (ou supomos estar) o ponto decisivo: por causa de um *indeterminismo fundamental* na mãe natureza (no seu nível quântico, óbvio), há um jogo dialéctico (não hegeliano, insistimos) envolvendo os contrários *determinação* e *indeterminação*, postos a nu pelas medições humanas e do restante da natureza, do meio ambiente (descoerência). No presente raciocínio, contudo, falta lidar com algo *quantitativo*, item sempre necessário numa ciência como a física.

4. Pequena Incursão Dialéctico-Bohriana No Formalismo Quântico

Buscaremos entender duas famosas formulações quânticas – uma de Louis de Broglie e outra de Werner Heisenberg – por meio de arrazoados dialécticos de feições não contraditórias, na linha de raciocínio seguida até este momento. Datando de 1927, a elaboração do cientista alemão é posterior à do francês, de poucos anos antes; todavia, como necessitaremos daquela para também abordar dialecticamente esta, começaremos pelo feito heisenbergiano: o tão citado princípio da incerteza ou indeterminação, agora focalizado na sua matematização. Julgamos que, tal como consideramos a dialéctica bohriana neste artigo, a via da sua aplicação à matemática de Heisenberg será a que tomar por objeto a desigualdade do formalismo elaborado por este, o qual mostra que *precisão* numa grandeza (como posição) acarreta *imprecisão* em outra (como *momentum* ou velocidade). Nas palavras mais técnicas de Osvaldo Pessoa Jr., temos a subsequente situação⁵⁵:

[...] pelo princípio de incerteza, não é possível que estas duas grandezas, posição e velocidade, tenham simultaneamente valores exatos. Se nós reduzirmos ao máximo a incerteza (ou melhor, a indeterminação) da posição de um átomo, ou seja, se δx for próximo de zero, isso terá como

55 “O princípio da incerteza”. www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_principio_incerteza.htm. Accessed 29 July 2016.

conseqüência que a velocidade não será definida de maneira exata, mas terá uma indeterminação de δvx , de tal forma que o produto $\delta x \cdot \delta vx$ será sempre maior do que uma certa constante, de valor $h/4m$ (m é a massa do corpo e h a chamada “constante de Planck”). Isso costuma ser expresso matematicamente da seguinte maneira: $\delta x \cdot \delta vx \geq h/4m$.

Como é sabido, já em 1927, Bohr e Heisenberg se puseram de acordo, não sem alguma disputa de ideias (uma boa discussão), a respeito da congruência entre o princípio da complementaridade e o da indeterminação ou incerteza. A única possível novidade que há agora resulta do nosso direcionamento da noção de dialéctica ao próprio formalismo heisenbergiano. Ora, a matemática inserida na citação acima está expressando uma inter-relação entre *determinação* na posição (quando δx “for próximo de zero”) e *indeterminação* no *momentum* ou velocidade (δvx), duas grandezas então associadas à h (“constante de Planck”). Claro, o arrazoado vale para a situação inversa: por imposição da quântica mãe natura, *determinabilidade* no *momentum* implicará *indeterminabilidade* na posição (o mesmo se notando nas medições de outras grandezas conjugadas, ou pares de observáveis, como tempo e energia). A *díade determinação/indeterminação* (sempre tomando em obrigatoria consideração h , o terceiro factor em jogo) participa de uma *dialéctica* envolvendo noções *não contraditórias*, mas apenas *contrárias*, que “não [...] tenham simultaneamente valores exatos”. Neste passo da argumentação, talvez um neo-hegeliano pudesse bater pé, assim arguindo: *Pois bem, o duo determinação/indeterminação não é uma demonstração de que, ao fim e ao cabo, o velho Hegel estaria correto, se aplicássemos a sua dialéctica – na qual a contradição exerce um papel decisivo – ao mundo quântico? Um quadro contraditório, afinal, não acabou por ser pintado pelo princípio da incerteza?* Parece-nos que a resposta a tal hipótese é negativa, uma vez que não nos esqueçamos do que o físico Antonio S. T. Pires ressalta, a propósito da situação posta em foco pelo princípio de Heisenberg: “[...] a razão pela qual não podemos medir *posição* e *veloci-*

dade ao mesmo tempo com uma precisão arbitrária é porque o conceito de posição e [o de] velocidade *não existem ao mesmo tempo*⁵⁶.

O criador da noção quântica da indeterminação chegou a idear um experimento para ilustrar a sua desigualdade. Ramaiana Gazzinelli assim o descreve:

Heisenberg explicou [...] o princípio da incerteza por meio de uma experiência imaginária que utilizava um microscópio para medir posição e momento [...]. Para observar uma partícula num microscópio, é preciso iluminá-la com um feixe de luz; os fótons, ao colidirem com ela, *se dispersam em diversas direções e a partícula recua com o impacto*. Para medir a *posição* do elétron *com precisão*, é preciso utilizar luz de *comprimento de onda curto*; nesse caso, porém, o *momento* dos fótons é *grande* (o momento é inversamente proporcional ao comprimento de onda) e perturba muito o elétron, cujo *momento* é, então, medido com *incerteza grande*. Se não quisermos deslocar muito o elétron, precisamos iluminar com luz de *comprimento de onda longo* (fótons de pequeno momento); a colisão *não altera muito o momento* do elétron, mas revelará a *sua posição imprecisamente*, porque o comprimento de onda é grande⁵⁷.

Em síntese, teremos a seguinte situação, na qual os qualificativos *contrários* não se manifestam de maneira contraditória, porque não atuam em conjunto, no que concerne quer à grandeza de posição quer à de momento, de cada vez:

| QUADRO (1) DECORRENTE DO EXPERIMENTO IMAGINÁRIO DE HEISENBERG: | | |
|--|---|--|
| comprimento de onda <i>curto</i> dos fótons | posição <i>precisa</i> do elétron medido | momento <i>grande (impreciso)</i> do elétron medido |
| comprimento de onda <i>longo</i> dos fótons | posição <i>imprecisa</i> do elétron medido | momento <i>pequeno (preciso)</i> do elétron medido |

56 Pires, 2012, 43: dest. nos.

57 Gazzinelli, 2013, 87–88: dest. nos.

Vamos adiante no raciocínio, procurando esclarecer mais.

No *domínio clássico*, a posição e o momento de uma partícula (não quântica, necessariamente) podem ser determinados (medidos) *em simultâneo*, com grande exatidão, porque em tal domínio os efeitos da dualidade onda-partícula são *irrelevantes*⁵⁸. Já no *regime quântico*, os efeitos da aludida dualidade são *bastante consideráveis*, impedindo, justamente, a determinação (medição) precisa desses momento e posição *ao mesmo tempo*. Aqui, seria contraditório se a esfera ondulatória e a corpuscular se manifestassem de *idêntica maneira*, com igual teor de determinabilidade: não podem fazê-lo não só porque são diversas uma da outra, mas por participarem de facetas distintas (complementares) do real atômico e subatômico, sem que se neguem em termos apropriados à lógica do filósofo de Iena. Prova disto é que, *nos âmbitos da incerteza e da complementaridade*, não existe uma hegeliana “razão positiva” – para não falar em “síntese” – das duas entidades”. Caso a determinação e a indeterminação se comportassem de acordo com a negação dialéctica (“razão negativa”) de Hegel, ao fim do processo (ou de uma medição bem sucedida) obteríamos o que, na verdade, não obtemos: *ou determinação completa ou completa indeterminação do elemento quântico como um todo*, segundo a lei da “negação da negação” do pensador, pois a determinação negaria a indeterminação ou a indeterminação negaria a determinação⁵⁹... Em suma: quando a determinação concerne a *x*, a indeterminação *não* concerne a *x*; quando a determinação concerne a *vx*, a indeterminação *não* concerne a *vx*. (Obrigamo-nos a esta redação algo tautológica, para discordar dos defensores do raciocínio dialéctico no qual a contradição habite uma só entidade, em concomitância. Sendo

58 A função de onda associada a uma bola de futebol, por exemplo (aliás, exemplo recorrente nas obras da área), tem comprimento pequeno demais para provocar efeitos quânticos assinaláveis: cf. Bezerra and Orsy, 2013, 68 (n. 23).

59 Segundo as pegadas do mestre alemão, de novo um neo-hegeliano poderia (contra) argumentar: ele diria que, na dialética do pensador, a “razão positiva” (ou “síntese”) *ao mesmo tempo negaria e conservaria* o conceito negado (posição ou *momentum*) em termos de determinação ou indeterminação. Isto, porém, não parece aplicar-se à mecânica quântica. (Sabe-se que a manutenção da acepção de “conservação” e da “negação” foi encontrada por Hegel na sua língua natal: nela, *Aufheben* remete às duas acepções aludidas. Aliás, ele via “muitas vantagens” no facto de que, em alemão, certos símbolos vocabulares tivessem não só “significados diferentes, mas *opostos*” – Hegel, 1990, 112: dest. nos.).

polêmica, ela não nos soa trivial, em tal contexto de debate, o qual nos força a fazer valer a tautologia.)

Falando em parte com os conceitos do Estagirita, se o par de contrários (determinismo/indeterminismo, ou precisão/imprecisão) *pertencesse e não pertencesse ao mesmo tempo e sob o mesmo aspecto à mesma grandeza (δx ou δvx) do quantum, com a sua onda associada*, não haveria dúvida de que a contradição se evidenciaria – o que não ocorre, uma vez que os termos opostos dizem respeito a *entidades diferentes*. Retomando o Heisenberg neoaristotélico, e ampliando o raciocínio para a dualidade dos *quanta*, devemos dizer: *uma primeira entidade (onda) concerne à potência e uma segunda (corpúsculo) ao ato, e o que se dá em cada um destes dois setores não se contrapõe de feição contraditória ao outro.*

As representações gráficas seguintes resumem o que dizemos, discriminando duas modalidades da abordagem dialéctica das coisas (neste ponto, *incompatíveis*):

QUADRO (2) DE UMA DIALÉCTICA QUÂNTICA (OU SEM CONTRADIÇÃO E EM COMPATIBILIDADE COM $\delta x \cdot \delta vx \geq h/4m$):

determinação relativa à grandeza A (por ex., posição)

indeterminação relativa à grandeza B (por ex., momentum)

QUADRO (3) DE UMA DIALÉCTICA NÃO QUÂNTICA (OU COM CONTRADIÇÃO E EM INCOMPATIBILIDADE COM $\delta x \cdot \delta vx \geq h/4m$):

determinação relativa à grandeza A (por ex., posição)

indeterminação relativa à mesma grandeza A (de novo posição)

Passemos à prometida tentativa de enfoque dialectizante do segundo formalismo. Neste passo, ousaremos demais (sem intenção de fazê-lo), socorrendo-nos de uma esclarecedora informação de Ivan S. Oliveira, relativa a uma fórmula de Louis de Broglie, de 1923-24, preciosa no âmbito da mecânica dos *quanta*: a equação $p = h/\lambda$. Afirma o físico brasileiro a propósito da equação transcrita (também chamada “compre-

mento de onda de De Broglie"): "[...] Do lado esquerdo temos o momento [p], uma *quantidade típica de partícula*, e do lado direito o comprimento de onda [λ], *típico de fenômenos ondulatórios*. A ‘interface’ entre as duas quantidades é a constante de Planck [\hbar], *assinatura dos fenômenos quânticos*"⁶⁰.

Interpretemos filosoficamente a concisa, elegante equação, não de feição isolada, concentrada apenas nos seus três termos (p , \hbar , λ), mas em associação às complementaridade bohriana e indeterminação heisenbergiana de 1927, ou seja, como evidenciação de um jogo dialéctico (não hegeliano) no mais íntimo âmago conhecido da natureza, de novo envolvendo determinição e indeterminismo: tal equação lida com o par de grandezas p e λ e estas acabam implicando, por via do princípio da indeterminação, que a *precisão* em momento acarrete *imprecisão* em posição e vice-versa. Jogo de diferenças (alteridades) abarcando λ e p , no domínio quântico. Presença da dialéctica (complementar) na matemática do francês Louis de Broglie, por conseguinte (ou assim pensamos), desde que a esta sejam relacionados os princípios respectivos do físico dinamarquês e do alemão. (Não espanta, portanto, que se haja forjado o neologismo algo lúdico “waveicle” – “ondícula”, “portonda” –, na tentativa de capturar conceitualmente esta dúvida entidade não clássica, o mínimo “ornitorrinco” quântico portador das propriedades ondulatórias e corpusculares que constituem a matéria e a energia conhecidas⁶¹, inclusive, claro, as energia e matéria que concernem aos clássicos mamíferos que põem ovos, perambulando por regiões do planeta...).

Outra vez, o facto de haver, afinal, os “fenômenos intermediários” entre onda e partícula não deverá invalidar o raciocínio acima (se este for pertinente, em sua passagem da *dialéctica qualitativa* herdada por Bohr de Kierkegaard e outros, ao factor *quantitativo*, explícito na fórmula de Louis de Broglie). Afinal, as “portondas” ou “ondículas” não foram descartadas, quando da detecção desses fenômenos – bem pelo contrário!

60 Oliveira, I. S., 2010, 84: dest. nos.

61 Cf. Polkinghorne, 2011, 89. Este cientista (que se tornou sacerdote) lembrou-se da realidade dúvida do ornitorrinco, ao pensar na dualidade onda-partícula.

5. Realismo Onde Não se Esperaria Encontrá-Lo?

Agora, devido ao tópico do realismo, obrigamo-nos a uma breve reflexão conceitual.

Poderíamos ter intitulado este artigo não com a expressão “dialética quântica da natureza”, mas, de maneira menos arriscada, escrevendo algo como “dialética da complementaridade”. Evitaríamos assim a questão do *realismo*, endereçada a Bohr. Haveria boa razão para isto. Em “O yin-yang da complementaridade”, Osvaldo Pessoa Jr. pondera⁶²:

Em alguns experimentos, [o elétron] se comportaria como partícula, em outros, como onda. Poderíamos dizer que ele é uma entidade mais complexa, um “quanton” [...], que só pode ser observado sob uma perspectiva ou outra? Essa leitura realista é interessante, mas não era assim que Bohr pensava. Pode-se dizer que Bohr era um “instrumentalista” ou “positivista” [...], ou seja, para ele a tarefa da ciência seria descrever o que se pode observar, e não especular metafisicamente sobre aquilo que está para além das possibilidades de observação.

Cientistas do porte de Max Planck, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Albert Einstein e David Bohm, além de pensadores como Karl Popper, entre vários outros, tentaram contrapor-se a certa imagem se não de anti-realismo, ao menos de não realismo, inconsistentemente associada à dita Escola de Copenhaga (denominação duvidosa em termos de consenso interno, sabemos). Tendo em vista a dificuldade de lidar-se com ondas e partículas de maneira direta e em simultâneo, acrescida ao facto de que o sujeito experimentador exerce um papel não secundário em mecânica quântica (o que, em geral, é tratado como “o problema da medição”), abrindo espaço até para suposições (idealistas, subjetivistas) de que a consciência cria a realidade (ousada e jamais comprovada especulação que, já nos anos 1930, contou com cabeças como as de John

⁶² http://www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_yin_yang.htm. Accessed 08 February 2013.

von Neumann, Pascual Jordan, Fritz London e Edmond Bauer⁶³), comprehende-se que a abordagem realista dos *quanta*, com as suas ondas associadas, fosse de algum modo *preterida*, diante do “instrumentalismo”, “operacionalismo” ou “positivismo” copenhaguanos, sob a batuta de Bohr.

Em extenso trabalho publicado primeiro na língua inglesa, em 2006 (de revelador título *Chasing reality: strife over realism*), Mario Bunge aponta a – digamos – “falha” dos ilustres defensores de uma *visão realista também para o domínio quântico*, perante a “interpretação positivista”: “Lá onde eles [Planck, Einstein, Schrödinger] *incorreram em erro* foi na sua *nostalgia pela física clássica*. Nesse particular, Einstein estava errado e Bohr certo. *Realismo não implica classicismo*”⁶⁴. Por interessante coincidência, na mesma época Osvaldo Pessoa Jr. escrevia também: “[...] queremos apenas sublinhar que quem morreu [...] não foi o *realismo em geral*, mas um certo tipo que chamaremos de *realismo classicista*, a tese de que *a realidade tem uma estrutura próxima às nossas concepções e intuições clássicas a respeito do mundo*”⁶⁵.

Soa quase paradoxal notar como mentes que, com brilho, demoliram a possibilidade de aplicação das principais conquistas da mecânica clásica ao regime dos *quanta* hajam hesitado face a todas as consequências que as descobertas delas trouxeram à ciência. Assim ocorreu, porém. Às afirmativas de Bunge e Pessoa Jr. podemos juntar a de Polkinghorne: “Se a teoria quântica está, de fato, dizendo-nos como o mundo atômico *realmente é*, então sua realidade é algo muito diferente da *objetividade ingênua* com a qual podemos abordar o mundo dos objetos cotidianos”⁶⁶. Deve haver, todavia, mais de um meio de escapar da *ingênua objetividade* que será a de um *realismo clássico*, posto em xeque justamente pela revolução quântica. Parece-nos que, retomando Aristóteles, o Heisenberg dos anos 1950 (*Física e filosofia*) sinalizou uma via para a *reabilitação do realismo*: repetindo com Osvaldo Pessoa Jr., o criador do princípio da indeterminação “passou a sustentar que a *função de*

63 Pessoa Jr., 2006, 54 e 58; Herbert, 1989, 41–42.

64 Bunge, 2010, 110: dest. nos.

65 Pessoa Jr., 2006, 104: dest. nos. (A primeira edição desta obra é de 2003.)

66 Polkinghorne, 2011, 101: dest. nos.

onda [...] exprime uma *potencialidade*, no sentido aristotélico, relacionada a uma *propriedade “objetiva”* que *independe do estado de conhecimento do observador*⁶⁷. Isto equivale a supor que, afinal, a equação de Schrödinger aponte para algo real, que as suas possibilidades e potencialidades (amplitudes elevadas ao quadrado) mereçam consideração deveras ontológica (alicerçada pela *dynamis* ou *potentia* que Aristóteles decerto não sonhou como apropriadas para o futuro e longínquo quantismo, como, mais próximo deste, tampouco o fez David Hilbert com o seu *espaço de configuração*...).

Reforcemos o raciocínio presente com o contributo de dois outros cientistas. O primeiro deles é Georges Gamow. Em *Biografia da física* (obra de divulgação cuja edição original data de 1961), esforçando-se para nos convencer da realidade implicada na matemática da função de onda por meio de comparações com entidades ainda clássicas, ele escreveu:

Será a função ψ (ou antes, seu quadrado) que dirige a trajetória da partícula material, uma “entidade física” definida que *existe* no mesmo sentido em que os átomos de sódio e os balísticos intercontinentais existem? A resposta depende do sentido que se dê a palavra “existência”. As funções de ondas “existem” no mesmo sentido que as trajetórias dos corpos materiais. As órbitas da Terra em torno do Sol ou da luz em torno da Terra *existem* no sentido matemático representativo do contínuo de pontos consecutivamente ocupados por um corpo material em movimento. Mas *não existem* no mesmo sentido dos trilhos ferroviários que guiam o movimento de uma composição através do país. [...]⁶⁸.

Poderíamos requerer que, acima, Gamow tivesse pensado um pouco na distinção entre, de um lado, a realidade da trajectória de um corpo material como a Terra e a realidade do formalismo matemático que busque

67 Pessoa Jr., 2006, 96: dest. nos.

68 Gamow, [s.d.], 281–282.

representar simbolicamente essa trajectória. Embora sem diferenciar bem o representado e a representação, a sua argumentação, todavia, é já relevantíssima para os nossos propósitos.

O outro cientista aventado é Michel Paty. Por sua vez, ele ponderou: “É suficiente considerar que a função de estado [...] representa o sistema no seu *sentido físico* – e *não somente como um formalismo puramente matemático* –; e que os ‘operadores’ que determinam essa função de estado [...] descrevem as *propriedades físicas efetivas* – ou *objetivas* – desses sistemas”⁶⁹.

Se, por um lado, admitirmos que, graças à indeterminação de Heisenberg, o sujeito medidor exerce uma grande influência na grandeza que vier a medir (sem precisarmos crer que a sua consciência possua alguma espécie de “poder mental” causativo do colapso do vetor de estado) e, por outro lado, aceitarmos que a matemática da função de onda capte *efetivas propriedades físicas* – que renomearemos, junto com o Heisenberg neo-aristotélico, como *potentiae* –, então talvez seja consistente efetuar uma *interpretação realista* do princípio da complementaridade de Bohr, para além da suposta postura “instrumentalista” deste. Alguns viram em tal princípio uma feição de *dialética não hegeliana*. Por pouco que seja, buscamos fortalecer essa linha exegética. Alguns mais continuam propugnando por uma concepção realista da física quântica. Aceita esta última concepção, um passo a ser dado é o de examinar uma eventual “dialética quântica *da natureza*”. Bem ou mal, isto foi o que também intentamos.

Referências

Alcácer, L., 2012, *Introdução à mecânica quântica*, São Paulo, Livraria da Física.

Aristóteles, 1990, *Metafísica*, trad. Valentín García Yebra, 2^a ed. rev. 2^a reimpr, Madrid, Gredos.

⁶⁹ Paty, 2009, 81: dest. nos.

Aristóteles, 2005, *Órganon: Categorias, Da interpretação, Analíticos anteriores, Analíticos posteriores, Tópicos, Refutações sofísticas*, trad. e n. Edson Bini, Bauru/SP, EDIPRO.

Berti, E., 2013, *Contradição e dialéctica nos antigos e nos modernos*, trad. José Bortolini, São Paulo, Paulus.

Bezerra, D. and Orsi, C., 2013, *Pura picaretagem*, São Paulo, LeYa.

Bohr, N., 2000, O postulado quântico e o recente desenvolvimento da teoria atômica. In: Pessoa Jr., O. (Org.), *Fundamentos da física 1: simpósio David Bohm*, São Paulo, Livraria da física, p. 135–159.

Bohr, N., 2008, *Física atômica e conhecimento humano*, 4^a reimpr., trad. Vera Ribeiro, Rio de Janeiro, Contraponto.

Bunge, M., 2010, *Caçando a realidade: a luta pelo realismo*, Trad. Gita k. Guinsburg, São Paulo, Perspectiva, 2010.

Bussola, C., 1994, *Filosofia para o curso básico universitário*, 3^a ed. rev. e ampl., Vitória, Fundação Cecílio Abel de Almeida.

Eisberg, R. and Resnick, R., 1979, *Física quântica*, trad. Paulo Costa Ribeiro et al., Rio de Janeiro, Elsevier.

Engels, F., 1976, *A dialéctica da natureza*, 2^a ed., Rio de Janeiro, Paz e Terra.

Ferreira, M.J.C., 1990, Apresentação. In: Hegel, G. *Prefácios*, trad., intr. e n. Manuel J. Carmo Ferreira, Lisboa, Imprensa Nacional-Casa da Moeda, p. 97–104.

Feynman, R., 2012, *Sobre as leis da física*, trad. Marcel Novaes, Rio de Janeiro, Contraponto.

Gamow, G., [s.d.], *Biografia da física*, sem indicação do tradutor, Rio de Janeiro, Zahar.

Gazzinelli, 2013, *Quem tem medo da física quântica?*, Belo Horizonte, Editora da UFMG.

Gleiser, M., 2014, *A ilha do conhecimento: os limites da ciência e a busca do sentido*, 2^a ed., Rio de Janeiro, Record.

Hegel, G., 1988, *Encyclopédia das ciências filosóficas em epítome*, trad. Artur Morão, Lisboa, Edições 70, V. I.

- Hegel, G., 1990, *Prefácios*, trad., intro. e n. Manuel J. Carmo Ferreira, Lisboa, Imprensa Nacional–Casa da Moeda.
- Heisenberg, W., 1999, *Física e filosofia*, 4^a ed., trad. Jorge Leal Ferreira, Brasília, Ed. da Universidade de Brasília.
- Herbert, N., 1989, *A realidade quântica*, trad. Mário C. Moura, Rio de Janeiro, Francisco Alves.
- Hollauer, E., 2008, *Química quântica*, Rio de Janeiro, LTC.
- Holton, G., 1984, As raízes da complementaridade. *Humanidades*, trad. Dinorah de Oliveira Mendes, Vol. II, n. 9, out.–dez., p. 49–81.
- Hösle, V., 2007, *O sistema de Hegel*, trad. Antonio Celiomar Pinto de Lima, São Paulo, Loyola.
- Konder, L., 2014, *O que é dialéctica*, 14^a. ed., São Paulo, Brasiliense.
- Lalande, A., 1993, *Vocabulário técnico e crítico da filosofia*, trad. Fátima Sá Correia et al., São Paulo, Martins Fontes.
- Machado, N.J., 2013, *Matemática e realidade: das concepções às ações docentes*, 8^a ed., São Paulo, Cortez.
- Meneses, R.D.B., de. 2008, Da mecânica quântica à filosofia. *Eikasia. Revista de filosofia*. Año III, 17, marzo, p. 75–126. <http://www.revista-defilosofia.org>. Accessed 17 February 2016.
- Oliveira, I.S., 2010, *Física moderna*, 2^a ed., São Paulo, Livraria da Física.
- Paty, M., 2009, *A física do século XX*, trad. Pablo Mariconda, Aparecida, SP, Ideias & Letras.
- Pessoa Jr., O., 2006, *Conceitos de física quântica*, 3^a ed., São Paulo, Livraria da Física, 2006, Vol. I e II.
- Pessoa Jr., O., O princípio da incerteza (URL: www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_principio_incerteza.htm). Accessed 29 July 2016).
- Pessoa Jr., O., O yin-yang da complementaridade (URL: http://www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_yin_yang.htm). Accessed 08 February 2013).
- Pinto Neto, N., 2010, *Teorias e interpretações da mecânica quântica*, Rio de Janeiro, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/São Paulo, Livraria da Física.
- Pires, A.S.T., 2012, *Enigmas do universo*, São Paulo, Livraria da Física.

Polkinghorne, J., 2011, *Teoria quântica*, trad. Iuri Abreu, Porto Alegre, L&PM.

Reale, M., Variações sobre a dialéctica. (URL: www.miguelreale.com.br/artigos/vdialetica.htm. Accessed 27 May 2016).

Selleri, F., 1997, Complementaridade e/ou teoria quântica. In: Siqueira, A.F.; Bastos Filho, J.B. (Orgs.), *Reflexões sobre os fundamentos da física moderna*, Alagoas, EDUFAL, p. 13–29.