

As possibilidades de ontologia presentes na teoria da física quântica

Leandro Tibiriçá de Camargo Bastos¹

Resumo: O presente artigo visa expor as principais teorias do campo da física quântica, assim como suas implicações ontológicas. Não se busca, aqui, uma interlocução com teorias metafísicas estabelecidas no campo da filosofia, nem mesmo uma exploração extensa da bibliografia estabelecida nas ciências. Foi usado um livro para a exposição geral das teorias, de seus desdobramentos e de suas consequências. No caso, trata-se do livro *Quantum ontology: A guide to the metaphysics of quantum mechanics*, de Peter J. Lewis. Foi privilegiada, portanto, uma abordagem em que a abrangência foi preferida em relação à profundidade. Um cotejamento cuidadoso com outras teorias metafísicas teria trazido uma visão mais específica dos possíveis problemas de fundo presentes tanto na ontologia (nas ontologias) derivadas da mecânica quântica quanto nas teorias cotejadas, mas a consequência seria retirar apresentações de outras possibilidades presentes dentro da própria teoria da mecânica quântica. Preferimos, portanto, apresentar um panorama amplo, de modo a contextualizar o leitor dentro de um campo de pesquisa, e deixar aprofundamentos específicos para outra oportunidade.

Palavras-chave: : mecânica quântica; física; filosofia; metafísica; ontologia.

¹ Leandro Tibiriçá de Camargo Bastos nasceu em São Paulo em 1975. Fez graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado na USP. Atua como professor universitário e tradutor. Traduziu a peça *A tragédia espanhola*, de Thomas Kyd, ainda inédita em português. Participou do grupo Tradução e relação, tendo sido responsável por um dos capítulos do livro *Tradução em relação: espaços de transformação*. Participa do Grupo de Estudo de Dramaturgia Contemporânea. Publica regularmente artigos acadêmicos em revistas nas áreas de literatura inglesa e tradução, tratando das intersecções entre tradução, teatro e filosofia. Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1501-9512>.

The possibility of ontology in the theory of quantum physics

Abstract: This article presents the main theories in the field of quantum physics as well as their ontologies. We are not looking for a dialogue with advanced metaphysical theories in the field of philosophy, not even for an extensive exploration of the established bibliography in the sciences. One book is used for the general exposition of the theories, their development, and consequences: *Quantum ontology: A guide to the metaphysics of quantum mechanics* by Peter J. Lewis. The paper adopts an approach in which breadth is preferred over depth. A careful comparison with other metaphysical theories would have brought a more specific view of the possible background problems both in the ontology (ontologies) derived from quantum mechanics and in the theories compared between themselves, but the consequence would have been the neglect of other possibilities of theory of quantum mechanics. Instead, the paper presents a broad overview in order to contextualize the readers in a research field and leave more specific topics for another occasion.

Keywords: quantum mechanics; physics; philosophy; metaphysics; ontology.

A palavra *ontologia* nos remete à filosofia, mais precisamente, à chamada filosofia primeira, já que é desse campo que se espera a base para os outros ramos de um sistema filosófico. Esse raciocínio, no entanto, não procede em relação ao livro *Quantum Ontology: A Guide to the Metaphysics of Quantum Mechanics*, de Peter J. Lewis (2016). Uma folheada nas referências no final do livro deixa isso claro. Nomes como Descartes, Hegel e Heidegger, entre outros possíveis gigantes da metafísica na filosofia ocidental, não são sequer citados. Por isso, acreditamos que a melhor tradução para o título não seria “ontologia quântica”, mas “ontologia da quântica”. Isso porque todo o livro é construído sobre descrições pormenorizadas (no nível leigo) dos sistemas da física quântica, e princípios metafísicos são daí extraídos.

Na introdução, o autor argumenta que sempre existiu ligação entre a física e a metafísica, na forma de especulação sobre as estruturas fundamentais da realidade (p. xiii). Mas é cuidadoso ao não deixar espaço para expectativas irrealistas sobre a física quântica, alertando que não existe a tentativa de colocar a física primeiro ou de praticar reducionismo filosófico, e demonstrando que sua importância reside no fato de ser uma área de especulação entre outras, porém, com o poder de quebrar expectativas (p. xvi). As seguintes teorias serão estudadas: a do colapso espontâneo, a das variáveis escondidas e a dos múltiplos mundos (p. xviii).

Vejam os conceitos básicos dos experimentos quânticos. O primeiro deles se chama “interferência”. O parâmetro é o estudo de ondas. Quando uma onda se propaga através de uma fenda em direção a um suporte na sua frente, aparece um reflexo. Se o mesmo for feito através de duas fendas, aparecem uma sequência de reflexos. A explicação é que, com duas ondas interagindo, as cristas resultantes serão refletidas, não os vales. O que parece intrigante é o fato de tal fenômeno ser inexplicável quando se lida com partículas. Segundo a física clássica, ao abrir uma fenda ou duas fendas, as partículas simplesmente passam por uma das duas e deixam uma marca no que estiver na frente. O fato específico da física quântica, aqui, é que se observam partículas (elétrons), mas seu comportamento é de ondas (p. 5). É o que o autor chama de “dualidade onda-partícula”.

O próximo fenômeno chama-se “entrelaçamento”. A primeira coisa a entender é o processo chamado *spin* (‘giro’). As partículas *quantizadas* (ou seja, com características discretas, não contínuas) têm momentos angulares específicos. Quando o elétron passa por um campo magnético, a reação pode ser, de acordo com seu momento angular, a de ser desviada

para cima (*spin-up*), ou a de ser desviada para baixo (*spin-down*). Tais partículas são chamadas de partículas $\text{spin } \frac{1}{2}$ (p. 7). O entrelaçamento se dá quando uma partícula se divide em dois. Nesse caso, uma parte será *spin-up* e a outra, necessariamente, *spin-down* ou vice-versa. Por essa correlação necessária é que as partículas são ditas emaranhadas (p. 8).

A partir disso que começa a disputa por explicações. O teorema de Bell vai dizer que a causa do entrelaçamento quântico não pode ser assinalada a propriedades das partículas individuais (p. 9). Historicamente, temos duas teorias: a mecânica de matriz, de Heisenberg, Born e Jordan (que explica melhor o entrelaçamento) e a mecânica de ondas, de Schrödinger (que explica melhor a interferência). Na mecânica de matriz existem três elementos básicos: “o estado quântico, que representa o sistema físico que nos interessa, a lei dinâmica, pela qual o estado quântico muda ao longo do tempo, e o postulado de medição, que relaciona o estado quântico com os resultados de medições” (p. 10).

O estado físico é representado por um vetor, quer dizer, por uma lista de números representando os estados físicos básicos do sistema. Graficamente, teríamos setas ortogonais mostrando as respectivas direções das partículas, podendo ser *spin-up* $|\uparrow z\rangle$ (1,0) ou *spin-down* $|\downarrow z\rangle$ (0,1). Essa é a notação de Dirac para estados quânticos, e esses vetores são conhecidos como *eigenstates* ou *eigenvectors* (p. 10). Os estados dos *eigenvectors* podem ser identificados com *a* e *b*. O postulado de medida diz que a chance de obter estados *a* ou *b* corresponde ao quadrado de cada um deles (p. 13). A lei dinâmica, por sua vez, especifica como o sistema muda de acordo com o tempo, e é representada em uma equação (p. 15).

Podemos colocar a questão de como medir a posição em um sistema em que o comportamento de ondas e elétrons são tão relacionados. É aí que entra a mecânica de ondas. A resposta seria dividir o espaço em campos menores, localizando o elétron em um deles. Se houver uma divisão em cinco espaços com a partícula no primeiro, marcamos (1,0,0,0,0), se estiver no segundo (0,1,0,0,0), e assim por diante. Esses espaços são os vetores de um *eigenstate* dos operadores desses espaços (p. 17). Dependendo de onde estiver o elétron, a curva da função de onda da representação se apresentará de maneira diferente (p. 19).

No que diz respeito à interpretação, o autor chama a atenção para o fato de que não temos, no mundo quântico, descrições precisas dos fenômenos, mas sim de suas interpretações matemáticas. Outro fato importante é que nada na física quântica se parece com nossa vivência de mundo (p. 23). Essas afirmações colocam a questão de como interpre-

tar tais fenômenos. Pode-se revisar nossa ontologia sobre o mundo, de modo a descrevê-lo em algum aspecto. Pode-se também descartar a física quântica como algo que diga respeito de algum modo ao nosso mundo habitado. Também podemos imaginá-la apenas como dizendo respeito às nossas formas de conhecimento, ou ainda como uma descrição parcial, precisando ser complementada. São dessas possibilidades que o autor passa a tratar (p. 24).

No cap. 2 é debatido o problema do realismo ontológico. Como vimos, a dinâmica do sistema quântico não pode ser usada para descrever nosso mundo habitado (p. 26). Uma das maneiras de resolver esse desencontro de possibilidades ontológicas é dizer que a teoria quântica é uma teoria incompleta. Por ter sido formulada por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935, é conhecida como argumento EPR (p. 27). A questão que eles colocam é sobre o estado dos elétrons. Antes da divisão e dos spins se apresentarem (para cima ou para baixo), existem duas possibilidades. Ou tal estado (*spin*) não existe previamente, ou, o que os proponentes do teorema preferem, essa propriedade existe, mas a teoria não dá conta de explicar. Essa presunção se baseia em um princípio metafísico chamado “critério de realidade”: “Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, nós podemos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondente a esta quantidade física” (p. 28).

O problema é que a aplicação desse critério exclui o entrelaçamento quântico. Ao fazer a medição do primeiro elétron, o segundo já tem o *spin* previsível. Quer dizer que, para o segundo, podemos aplicar o argumento EPR? Não, pois já houve interação do sistema quântico com os aparatos de observação, o que viola o critério de não perturbação do sistema presente no argumento. O entrelaçamento, por sua vez, contraria um postulado da teoria da relatividade que diz não ser possível a interação com um sistema acima da velocidade da luz, portanto, um elétron não poderia influenciar outro de modo imediato. Mas, como explicar o problema da medição, quer dizer, a certeza em relação ao segundo elétron depois da manifestação do primeiro? Isso, para o argumento EPR, só pode ser explicado pelo fato de o segundo elétron já ter em si sua propriedade de *spin*, impossível de ser medida. Por isso dizerem que a física quântica é um sistema incompleto (p. 29). Mais ainda, sendo que, na teoria quântica, a expectativa de medição varia de acordo com a inclinação do eixo da reação, então não se pode nem alegar uma ignorância que poderia ser

futuramente resolvida. A única explicação seria uma influência externa, demonstrando a incompletude do sistema (p. 30).

Bohr respondeu apontando ambiguidades no critério de perturbação. Se disser respeito a uma perturbação mecânica, o segundo elétron não sofre influência da medição. O que está sendo influenciado são as condições do sistema (o ângulo de inclinação, por exemplo), não da partícula (p. 31). Para Bohr, portanto, o contexto é uma peça-chave para entender o funcionamento de um sistema. Medições como a dos *spins* dos elétrons, dependentes uma da outra, seriam complementares, e essa seria uma propriedade fundamental para Bohr: complementaridade. Só que isso contraria o fato de que o spin do segundo elétron não é, teoricamente, afetado pelo do primeiro, antes criaria um contexto para ele. Mas como, se são separados? (p. 33). É para assegurar essa lógica não pré-determinada que aparecem os teoremas de impossibilidade: (1) “as propriedades de *spin* dos elétrons e as medições a serem realizadas neles são independentes uns dos outros; chame isso de princípio da independência” (p. 36). (2) “o resultado da primeira medição não pode afetar as propriedades do segundo elétron; chame isso de princípio da localidade” (p. 36). Tais conceitos levariam ao teorema de Bell: “Dadas nossas duas suposições plausíveis, nenhuma atribuição de propriedades de *spin* às duas partículas pode reproduzir os resultados de medição que observamos — os resultados corretamente previstos pela teoria quântica” (p. 37).

O teorema de Kochen e Specker, por outro lado, demonstra que não é possível que “todas as quantidades para as quais a mecânica quântica faz previsões possam, simultaneamente, ter uma propriedade física consistente atribuída àquelas previsões” (p. 37). Nas palavras de Peter J. Lewis, “eles mostram que qualquer tentativa de reproduzir as previsões da mecânica quântica usando propriedades físicas resultará na atribuição de valores contraditórios às propriedades físicas do sistema” (p. 37).

Para o autor, portanto, o que resta é uma hipótese antirrealista. Temos, então, fundamento para um novo tipo de antirrealismo, não mais baseado em observações globais, mas em um domínio específico de pesquisa. Para Bell, assim como para Einstein, as características encontradas nos sistemas quânticos teriam que ser explicadas por características pré-existentes, e, portanto, a mecânica quântica precisaria ser complementada (p. 38).

Para tentar preservar uma ontologia realista a partir da mecânica quântica, seria necessário abrir mão do princípio da independência. Como veremos, revisões radicais precisariam ser feitas nas nossas expec-

tativas científicas. Ou assumiríamos que propriedades futuras poderiam influenciar eventos presentes, ou que existem variáveis ocultas influenciando dois componentes. Para tentar atingir essas possíveis explicações, primeiro, seria necessário superar o teorema Kochen-Specker. Esse teorema presume propriedades específicas para cada característica do sistema quântico. Mas, talvez, as propriedades dos sistemas não precisariam ser explicadas em termos de propriedades específicas para cada característica, mas pela posição das características. Sem essa correspondência um-a-um entre propriedades e características, as contradições do teorema Kochen-Specker não se apresentam (p. 41).

Podemos, agora, ver como diferentes teorias analisam o sistema quântico. A teoria GWR (colapso espontâneo) assume a existência de propriedades básicas e invoca uma lei determinista que as governa. A teoria de Bohm (variável oculta), também assume a existência de propriedades básicas, mas descreve o movimento dos elétrons de modo determinista. A teoria do multiverso, por sua vez, não assume propriedades básicas, já que, nesse caso, tanto o *spin-up* como o *spin-down* ocorrem em ramos diferentes da realidade (p. 41).

Tanto as teorias do colapso espontâneo como a das variáveis ocultas negam o princípio de localidade de Bell. A teoria do multiverso faz o mesmo, além de não precisar determinar uma localidade, já que ambas as trajetórias ocorreriam em ramos diferentes da realidade (p. 42).

Existindo múltiplas teorias confirmadas, como seria possível traçar uma metateoria (p. 44)? Isso torna a teoria quântica um caso único na história da ciência. Temos múltiplas teorias e talvez nenhuma delas venha a ser derrotada. E todas descrevem perfeitamente os dados observados. Isso não significa uma necessária recaída no ceticismo. O que isso significa é que temos um problema de medição (p. 45).

Como o sistema quântico possui duas variáveis, *spin-up* ou *spin-down*, não é possível medir a trajetória dos elétrons da mesma forma linear com que se mede a trajetória de uma bola de beisebol. É preciso aplicar o postulado de medida, que diz que a probabilidade de obter um resultado particular para um elétron é dada pelo quadrado do coeficiente daquele *eigenstate* (p. 47). Mas, é importante perceber que, o que temos neste caso, é um postulado matemático que descreve os possíveis resultados, não uma explicação de como eles ocorrem (p. 48). A aplicação do postulado de medida é necessária justamente porque, na mecânica quântica, não podemos aplicar a equação de Schrödinger, que serve para descrever a dinâmica nos outros sistemas da Física. As descrições dos dispositivos

de medida teriam que obedecer à equação de Schrödinger, mas, como não obedecem, isso demonstra que a mecânica quântica não é apenas incompleta, mas inconsistente, dada a contradição entre dispositivos de medição física e seus resultados contrários aos usuais. Este é o chamado problema de medição. Para resolvê-lo, é necessário eliminar o postulado de medida e encontrar explicações satisfatórias para a mecânica quântica. Essa é a função dos três sistemas já apontados, nos quais, agora, entraremos mais pormenorizadamente.

Na solução proposta pela teoria GRW (colapso espontâneo), a partícula tem que corresponder a um objeto macroscópico. De acordo com a dinâmica linear de Schrödinger, o resultado aponta para uma sobreposição entre as posições de *spin-up* e a de *spin-down*. Só que, imediatamente após a medição, uma das posições colapsa, indicando uma posição definitiva de uma das duas alternativas, seguindo as probabilidades dadas na regra de Born (p. 53).

Um problema encontrado nessa teoria é que nem todas as ondas da partícula colapsada seriam extintas, mas umas poucas deixariam um rastro. Isso seria solucionado com o estabelecimento de uma ligação mais difusa entre a atribuição de propriedades e o *eigenstate*. Mas isso criará outros problemas, como veremos adiante (p. 54).

Outra solução possível é dizer que, na teoria GRW, a onda se movimenta de maneira suave e contínua na maioria das vezes, mas em determinados momentos ela pode pular de modo descontínuo. No problema da passagem por duas fendas, a descrição da teoria diria que a onda passa pelas duas, mas que ela se concentra em um ponto após essa passagem (p. 55).

De modo contrastante, a teoria das variáveis ocultas vai dizer que, no experimento quântico, temos o tempo inteiro partículas. Para essa teoria, partículas são “entidades que ocupam um ponto espacial em qualquer momento, e cujos movimentos no tempo traçam linhas no espaço-tempo (trajetórias)” (p. 56). Esse sistema, de acordo com Bohm, é representado por uma função de onda mais as coordenadas representando a posição das partículas. Cada partícula ocupa um espaço de três dimensões, portanto, com duas partículas, temos um espaço de seis dimensões. Como a posição das partículas, após uma colapsar, será representada apenas por uma, essa partícula ocupará um espaço de seis dimensões. Esse espaço é chamado de variável X. Por isso, a teoria de Bohm é conhecida como teoria da variável oculta (p. 56).

Dessa maneira, teríamos um modelo em que a função de onda passa pelas duas frestas do experimento. Ao interagirem, gerariam pontos de alta frequência e de baixa frequência. As partículas seriam distribuídas seguindo esses fluxos de frequência. Essa distribuição seguiria a lei dinâmica de Bohm. Desse modo, precisaríamos de embasamento em uma dupla ontologia, que incluísse o comportamento de ondas e de partículas (p. 59).

Vejamos, agora, a teoria do multiverso. Para Everett (1957), não é necessário substituir o postulado da medida nem por um mecanismo de colapso, como na GWR, nem por uma localização precisa das partículas, como em Bohm. Ele simplesmente se livra do postulado da medida e considera que a teoria está pronta (p. 59).

Nesse caso, ambas as partículas, a que se apresenta na parte de cima e a que se apresenta na parte de baixo do aparato de medida, são realizadas. Everett chama sua teoria de “estado relativo” realizado (p. 60). Desse modo, tanto o elétron em *spin-up* quanto o elétron em *spin-down* geram sinais no aparato de medida. Pessoas assistindo ao experimento irão ver ambos os sinais. Só que elas habitarão mundos diferentes, ambos com o mesmo estatuto ontológico, não meras possibilidades, mas mundos reais. Por isso, essa teoria é chamada de teoria do multiverso (p. 61).

Desse modo, o sistema é descrito seguindo fielmente a equação de Schrödinger. A função de onda dos elétrons se separa em dois pacotes diferentes, cada um passando por uma brecha. Depois disso, eles se unem e criam o padrão de onda característico. Esse padrão é entendido como a sobreposição em um grande número de termos, um para cada átomo atingido por um elétron. Todos esses elétrons vão emitir sinais e vão ser vistos, só que em mundos diversos (p. 62). Apesar dessa teoria falar em vários mundos, existem aqueles que vão falar em várias mentes (Lockwood, 1989) ou, ainda, em muitos fatos (Saunders, 1995; Lewis, 2016, p. 63).

Uma questão importante colocada por Lewis é a da episteme, já sugerida por von Neumann (1932) (Lewis, p. 64). A teoria que descreve os fenômenos de maneira mais particular é a do multiverso. As teorias do colapso espontâneo e da variável oculta acrescentam elementos aos fatos básicos. Alguns autores sugerem que isso se deva a uma espécie de “pre-conceito clássico”. Uma amostra disso seria a possibilidade de reduzir as três teorias à do multiverso. Na teoria do colapso espontâneo, poderíamos ver a partícula colapsada como pertencendo a um outro ramo, já na teoria das variáveis ocultas, poderíamos presumir que a variável que ficou com uma baixa frequência de onda não desapareceu completamente (p. 66).

Na visão de David Lewis (1986), a divisão em ramos da teoria do multiverso não descreve estados finais, mas apenas passagens no movimento de onda. E este continua se subdividindo. Dessa maneira, tanto a partícula colapsada como a partícula com baixa frequência de onda podem ser incluídas em alguns desses desmembramentos de ramos (Lewis, 2016, p. 68). Se a teoria do multiverso é empiricamente inadequada, os mecanismos adicionais postulados pelas teorias da variável oculta e do colapso espontâneo são complicações necessárias para capturar os fatos probabilísticos (p. 69).

Resumindo, se a teoria do multiverso tem problemas para explicitar suas probabilidades, a teoria do colapso espontâneo e a da variável oculta têm problemas com localidade, já que elas requerem casualidade instantânea, o que é proibido pela teoria da relatividade (p. 70).

No cap. 4, vemos o tema da indeterminação. Isso aparece na mecânica quântica pois, antes da medição, o elétron não tem qualquer determinação de *spin*. Para definir indeterminação, é preciso diferenciar propriedades determináveis de propriedades determinadas. As propriedades determináveis têm um certo espectro de propriedades e as determinadas especificam uma propriedade específica (p. 72). Um exemplo de indeterminação é o da composição. Segundo Tye (2000), a indeterminação na composição é endêmica, já que o limite dos objetos é marcado por partículas que variam de distância entre si. Já David Lewis (2016, p. 73) considera que a indeterminação é uma questão de linguagem, pelo menos para objetos macroscópicos. Ambas as análises, no entanto, são incompletas, pois deixam de lado o fato de que, no âmbito menos apto para a decomposição, o das partículas, elas podem se assemelhar a nuvens (p. 74).

Podemos pensar em indeterminação em um aspecto mais específico da mecânica quântica. Entre o *spin-up* e o *spin-down* existe uma infinidade contínua de valores que não vão formar nenhum *eigenstate* específico. Nesse ponto, pode-se lembrar o conceito de Barnes e Williams (2011). Eles dizem que a indeterminação metafísica é “bruta; é um aspecto irreduzível do mundo” (p. 78). Por isso é que é preciso especificar o conceito de ligação estrita (p. 76). “Ligação estrita: um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável se, e somente se, seu estado for um *eigenstate* do operador correspondente à propriedade, e o valor determinado é o *eigenvalue* para esse *eigenstate*” (p. 76).

Vemos, então, dois estados determinados permeados por inúmeros espaços indeterminados. Nesse caso, segundo Baym (1969), apenas o operador tem momento angular no eixo Z, e nota que os fótons que

estão em um eigenstate $|R\rangle$ ou $|L\rangle$ deste operador podem ser atribuídos um valor definido da componente z do momento angular [...] A qualquer outro estado de fóton $|\varphi\rangle$ não pode ser atribuído um valor definido de momento angular” (Lewis, 2016, p. 76).

Segundo o conceito de ligação estrita, qualquer coisa fora dos dois *eigenstates* é indeterminada (p. 79). Porém, existem outras possibilidades de análise. Uma delas é perceber as limitações da ligação estrita como algo inerente ao experimento de medição. Isso está ligado ao fato de, mesmo se o resultado do experimento for indeterminado, o observador só terá acesso à percepção do seu resultado por meio de um resultado determinado. Por isso mesmo, quando o experimento é indeterminado, o observador dirá que o seu resultado foi determinado. Essa é a base da teoria de Albert (1992) e Barrett (1999), que propõe a possibilidade de uma teoria quântica sem o postulado de medida, e a chamam de teoria nua. As propriedades seriam, portanto, atribuídas para o sistema como um todo, e quando não houvesse um *eigenstate* correspondente a uma propriedade, então o sistema seria simplesmente considerado indeterminado. Desse ponto de vista, o postulado de medida seria simplesmente redundante, já que a indeterminação seria eliminada no mundo habitado e indetectável na mecânica quântica. A consequência é que, “se a teoria nua é verdadeira, a indeterminação é onipresente” (p. 82). Isso coloca uma outra questão: como detectar uma evidência em meio à indeterminação generalizada? Isso tornaria a teoria nua empiricamente incoerente, como diria o próprio Barrett (1999): “argumentos epistêmicos contra a teoria nua são inconclusivos. A teoria nua envolve uma indeterminação radical em nossa experiência e no mundo, mas desde que também implica que a indeterminação não é distinguível da determinação, a indeterminação não pode ser usada contra ela” (*apud* Lewis, 2016, p. 83).

A indeterminação seria de tal modo geral que “tal teoria pode ser verdadeira — é apenas que, se fosse verdadeira, então nunca se saberia que era” (Barrett *apud* Lewis, 2016, p. 85). Uma opção seria aceitar ligações menos exatas do que a ligação estrita, criando não uma indeterminação radical, mas uma indeterminação moderada. Para isso, é preciso introduzir o conceito de “ligação obscura” (*fuzzy link*): “Ligação obscura: um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável se, e somente se, a projeção quadrada de seu estado em um eigenstate do operador correspondente é maior que $I - P$ ” (p. 87).

Essa noção não é extremamente problemática se confinada ao mundo microscópico. A ligação obscura pode trazer problemas ao apresentar

uma propriedade que se comporta como outra propriedade. Para isso, é preciso usar o conceito que Bell chama de PTPP: para todos os propósitos práticos (p. 88). Como o próprio nome diz, serve para assegurar que os objetos macroscópicos terão suas propriedades garantidas. Outro conceito que pode ser útil aqui é o de “ligação vaga” (*vague link*): “Ligação vaga: Um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável na medida em que a projeção quadrada de seu estado sobre um eigenstate do operador correspondente é próximo de I, onde o valor determinado é o *eigenvalue* para aquele eigenstate” (p. 89). A ligação vaga difere da ligação obscura no sentido de que esta última ainda preserva um limite entre propriedades. Já a ligação vaga assinala propriedades em termos de grau de aproximação (p. 89).

Isso pode ser importante para contornar a chamada anomalia contábil. É um problema que encontramos ao imaginar que um quadrado de mármore fica dentro de uma caixa, mas para n quadrados de mármore é impossível determinar a sua localização, pois seu coeficiente seria maior do que I, contrariando a definição de ligação obscura (p. 92). Isso acontece porque espaços minúsculos de acomodação, insignificantes na unidade, quando somados para um número muito grande de unidades, tornam o cálculo inexato. No entanto, na teoria GRW, em um objeto macroscópico, um elétron sempre se coloca em um *eigenstate*. Conclui-se, então, que não existe problema contábil se ele for imperceptível (p. 93).

Uma outra possibilidade é a formulada por Ghirard, Grassi e Benatti (1995). Os autores postulam que, na teoria GRW, existe um contínuo de distribuição de massa no espaço, denso em alguns lugares e rarefeito em outros. E isso explicaria a distribuição de partículas. Conhecida como a teoria da GRW maciça (p. 94). Diante dessas possibilidades, Lewis conclui que a anomalia contábil é uma falha de linguagem (p. 95). A ligação vaga estaria, portanto, mais próxima da concepção de mundo contínua da mecânica quântica (p. 96).

Uma diferença importante nas manifestações de indeterminação é que, na teoria GRW, os mecanismos de colapso mantêm os objetos macroscópicos nas suas posições de *eigenstates*, enquanto na teoria do multiverso, onde não existe colapso, os objetos macroscópicos ficam longe da sua posição de *eigenstates*. Diferente da teoria nua, no entanto, na teoria do multiverso os objetos têm as suas propriedades determinadas pelos seus respectivos ramos. O fenômeno físico que está por trás da distribuição entre os ramos é chamado de decoerência. Os dois componentes da função de onda interagem um com o outro depois que passam pelas bre-

chas para produzir a característica distribuição de probabilidade. “Quando dois desses componentes podem se juntar para produzir efeitos de interferência eles são descritos como coerentes” (p. 98). A questão é que, para observar o efeito de interferência, é preciso deixar o sistema isolado. Isso é “difícil para sistemas microscópicos, mas efetivamente impossível para os macroscópicos” (p. 98). Podemos dizer, então, que nos sistemas macroscópicos não existe interferência, constituindo ramos separados da realidade física (p. 98).

Apesar de não existir colapso no multiverso, a decoerência resulta em um colapso efetivo, já que, para habitantes de ramos diferentes, a expansão do processo vai interagir com o meio e produzir diferentes resultados. Desse modo, a teoria do multiverso se encontra com a teoria GRW (p. 99). Para garantir esse resultado, mais um tipo de *link* se faz necessário: “Ligação estrita relativa ao ramo (*branch-relative strict link*): um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável relativa a um ramo se, e somente se, seu estado relativo a esse ramo é um *eigenstate* do operador correspondente à propriedade, e o valor determinado é o *eigenvalue* desse *eigenstate* (p. 99).

Cairíamos, então, em uma indeterminação parecida com a da teoria nua, já que em cada ramo se constituiria como uma realidade diversa não determinada. O autor chama isso de “solipsismo relativo ao ramo” (p. 100). Por isso, é preciso introduzir mais dois tipos de ligação:

Ligação obscura relativa ao ramo (*branch-relative fuzzy link*): Um sistema tem um valor determinado para uma determinada propriedade determinável relativa a um ramo se, e somente se, a projeção quadrada de seu estado relativo a esse ramo em um *eigenstate* do operador correspondente for maior que $I - P$, onde o valor determinado é o *eigenvalue* desse *eigenstate*. [...] Ligação vaga relativa ao ramo (*branch-relative vague link*): Um sistema tem um valor determinado para uma determinada propriedade determinável relativa a um ramo na medida em que a projeção quadrada de seu estado relativo a esse ramo em um *eigenstate* do operador correspondente é próxima de I , onde o determinado valor é o *eigenvalue* desse *eigenstate* (p. 100).

Como no caso da teoria GRW, a escolha desses *links* se dará de acordo com a preocupação com que uma determinada propriedade se comporte como uma outra propriedade determinada (p. 100). Conclui-se que a indeterminação não analisável é endêmica no nível microscópico, mas, para todos os propósitos práticos, ausente no nível macroscópico (p. 101). Nem mesmo a teoria de Bohm se livra da indeterminação não analisável, já que o elétron tem uma posição determinada, mas um *spin* indetermina-

do (p. 103). Lewis, então, assinala o que tanto a teoria do multiverso, como a do colapso espontâneo e a da variável oculta têm em comum: “Indeterminação generalizada no nível microscópico que desaparece no nível macroscópico. Talvez aqui tenhamos nossa primeira consequência ontológica concreta da mecânica quântica: há indeterminação no mundo, e não tem nada a ver com composição ou (tipos familiares de) imprecisão” (p. 103).

A única maneira de eliminar a indeterminação seria utilizar uma abordagem retroativa, em que elementos da teoria da variável oculta podem ser determinadas por fatos futuros. Nesse caso, teríamos apenas posições, e não *spin*. Desse modo, não existiria indeterminação. O problema é que ainda seria preciso dar conta da função de onda. As propriedades da função de onda, seu grau de expansão e formato, são determinadas. Na teoria da variável oculta teríamos, nesse caso, partículas distribuídas de acordo com um determinado movimento de onda. No caso das teorias do multiverso e GRW, apenas o movimento da função de onda já seria o bastante para determinar seus resultados. O autor conclui que, talvez, seja melhor analisar a mecânica quântica nos seus próprios termos, quer dizer, de acordo com a função de onda (p. 105). A sensação de indeterminação viria do fato de que a onda tem as suas propriedades em contínuo de amplitude, e não em propriedades discretas, de acordo com a maneira tradicional do pensamento científico (p. 106).

No cap. 5, Lewis aborda o problema da causalidade. O autor começa falando sobre a localidade na física clássica, em que todos os fenômenos são locais, dependendo apenas das propriedades intrínsecas ao sistema. Uma exceção é a gravidade, em que uma partícula é afetada pela massa de todas as partículas em um determinado momento, independentemente da distância (p. 108). O princípio da localidade de Bell diz que, para um par de partículas separadas, a medição de uma não afeta instantaneamente as propriedades da outra. Mas, se um processo apresenta causalidade instantânea, ele não é local, ou seja, não depende só das características internas ao sistema. Isso significa que, ao se afastar do teorema de Bell, entra-se em conflito com a teoria da relatividade.

Um exemplo interessante é o de que a partícula 1 é medida como *spin-down* em uma primeira medição, mas, se a partícula 2 é medida primeiro, a primeira partícula será medida como *spin-up*. Percebe-se, então, que a mensuração da partícula 1 depende de um evento distante (p. 113). Não é que a teoria da relatividade proíba a existência de simultaneidade, ela apenas a torna ociosa. Portanto, para explicar a ação não local, é preciso adicionar outras influências causais, ou, como diria Einstein, uma

fantasmagórica “ação a distância” (p. 114). Dado o custo de se violar a lei da localidade, é preciso pensar em alternativas, mesmo que elas sejam contraintuitivas (p. 115). Se a mensuração de uma partícula depende de qual é realizada primeiro, pode se pensar, no nível microfísico, em uma causalidade reversa, que pode ser explicada pela simetria temporal das leis subjacentes (Price, 1996; Lewis, 2016, p. 116). Isso é chamado de abordagem da variável oculta reversa (p. 117). “Isso resgata um aspecto da nossa figura causal estabelecida, quer dizer, a localidade causal, às custas de uma outra, a saber, a da presunção de que as causas antecedem os efeitos” (p. 118).

Se abordarmos o efeito da medição como causando pacotes de onda, vemos que esses pacotes se dividem no momento da mensuração, alterando, dessa forma, a trajetória das partículas. Desse modo, a escolha de qual partícula será medida primeiro alteraria sua trajetória. Isso mostra que a não causalidade mostrada nas partículas não aparece no que diz respeito aos pacotes de onda (p. 119). Na teoria do multiverso, essa possibilidade se apresentaria de modo perfeitamente bem definido, já que o movimento de separação das ondas e a inclusão do observador não necessitaria de uma causalidade restrita, como na teoria da variável oculta. Já na teoria do colapso espontâneo, “é um processo físico de colapso, não o apelo para a localização do ramo do observador, que quebra a simetria entre observado e o não observado no resultado da mensuração” (p. 122).

Cada pacote de onda vale para ambas as partículas. Por isso, no caso da teoria do colapso espontâneo, teríamos o instante da mensuração da partícula determinando a posição de ambas, o que viola a causalidade prescrita pela lei da relatividade (p. 123). Uma maneira de contornar isso seria adotar o critério de influência reversa (p. 123). Do mesmo modo que na teoria da variável oculta, portanto, teríamos a influência de ondas retornando dos detectores, não violando, assim, o princípio da localidade (p. 124). Outra possibilidade é considerar os sistemas quânticos como descontínuos. Dessa maneira, as medições se dariam em *flashes*, assim como os eventos. Essa é uma ontologia adotada por Tumulka (p. 125). Para ele, os objetos macroscópicos são uma galáxia de flashes (p. 126). Uma das consequências mais interessantes da física quântica para o debate filosófico é que possibilita a volta da indeterminação no debate sobre o processo físico do mundo, não só na percepção humana. Vejamos algumas possibilidades.

No caso da teoria do multiverso, temos, por um lado, uma distribuição determinista por entre os mundos possíveis. Mas, no que diz respeito

ao observador específico de cada mundo, ela se apresenta indeterminista, já que é impossível saber de antemão qual a trajetória atômica que será apresentada. “Podemos dizer que a teoria do multiverso é objetivamente determinista, mas subjetivamente indeterminista” (p. 129). Outra possibilidade é a de atribuir a multiplicação do multiverso a várias consciências, como defendido por Saunders e Wallace (2008). Isso levaria a uma pseudoincerteza, já que restrita à percepção, enquanto a reação em si teria trajetórias identificáveis. Seguindo o mesmo raciocínio, chegamos à ideia de imortalidade. Se todas as reações são ramificadas em diferentes espaços-tempo, então, sempre que a morte se apresenta, existe a possibilidade de que, em algum espaço-tempo, um sujeito tenha sobrevivido. O problema com essa hipótese é que é possível pensar em outra possibilidade em relação ao momento da morte, mas não ao envelhecimento (p. 142).

E quanto ao livre-arbítrio? Vimos que a teoria de Bohm é determinista, e que a teoria do colapso espontâneo é indeterminista. Já a teoria do multiverso apresenta possibilidades não deterministas em uma física determinista subjacente. Como essas teorias encaram essa questão? Todas as teorias estão sujeitas à regra de Born. Esta prediz uma distribuição ao acaso, e este é tão incompatível com livre-arbítrio quanto o determinismo (p. 145). Na teoria do colapso espontâneo, se o sujeito é confrontado com duas opções, essas opções corresponderão a dois sistemas no cérebro determinados microscopicamente. Só que esse sistema circula, e por sua vez, estão em superposição com os estados gerais. De acordo com a dinâmica de Schrödinger, essa sobreposição é instável e acaba rapidamente colapsando para uma das opções (p. 146). Dessa maneira, após feita uma opção, o agente sempre pode perguntar o que o levou a fazer uma opção, e não outra. A resposta seria “nada”. Tal situação levaria a uma espécie de livre-arbítrio (p. 147). De acordo com uma concepção compatibilista, a causalidade passa pelo sujeito, que pressupõe processos físicos e mentais próprios. Dessa maneira, não haveria conflito entre determinismo e livre-arbítrio (p. 148). Se pensarmos em violar a independência, teremos duas opções: ou uma causa comum no passado remoto, ou uma causa que agiria de maneira retroativa no tempo (p. 148). Poderíamos pensar em uma teoria “rasa” ou “profunda”. Na primeira, a causalidade estaria próxima, o que enfraqueceria o livre-arbítrio. Na segunda, a causalidade estaria distante, fortalecendo o livre-arbítrio (ibid.).

A outra possibilidade, como vimos, seria de que a ação do sujeito afetaria as propriedades iniciais das partículas medidas em “uma maneira em que a causalidade seria nova e retroativa”. Dessa maneira, a escolha

seria livre (p. 149). E o que podemos dizer quanto às dimensões? Na teoria de Bohm, a configuração de espaço é de três dimensões em relação a uma partícula. Em um sistema de duas partículas, teríamos seis dimensões. Se no universo existem 10 sobre 80 partículas, significa que a função de onda é muito alta. Se essa é a função de onda que descreve uma entidade física real, “então a dimensionalidade do mundo físico é muito mais alta do que nós normalmente a consideramos” (p. 152).

Mas, se no mundo físico não existem três dimensões, a tridimensionalidade pode ser uma ilusão, ou a função de onda não representa o espaço diretamente, ou não o representa de nenhuma maneira. A configuração do espaço para partículas é inteiramente convencional. O mesmo não vale para campos. Já que os campos prescrevem números para cada ponto de espaço, “é mais naturalmente representado por uma função espacial de três dimensões” (p. 152). Para complicar ainda mais, “há várias representações de configuração do espaço correspondendo a uma única representação tridimensional” (p. 153). Como a função de onda tem a forma de um campo, ser realista em relação ao campo designa o realismo em relação ao espaço ocupado pelo campo: “Já que a função de onda é definida pela configuração do espaço, uma atitude realista da mecânica quântica se compromete com a existência de um espaço de $3N$ dimensões, onde N é o número de partículas do universo” (p. 154). Desse modo, teríamos muito mais dimensões do que o previsto. A explicação para termos uma percepção tridimensional é que essa corresponderia à “interpretação do comportamento dos objetos macroscópicos” (p. 156).

Outra possibilidade é a de que, falando objetivamente, não existem pessoas e objetos. Temos essa impressão pela maneira como o mundo macroscópico é configurado. Segundo Maudlin (2013), o que é diretamente observado são “problemas de fato locais, onde ‘local’ é para ser lido como ‘numa região restrita do espaço tridimensional’” (p. 158). Allori (2013) e Maudlin (2013) explicam a diferença entre as possíveis dimensões da função de onda por meio da nossa percepção, dizendo que a função de onda não deve ser usada para descrever as relações com a nossa percepção, mas que deve ser adicionada uma “ontologia primitiva” que é genuinamente tridimensional (Lewis, p. 159). Também seria possível pensar em uma função de onda com uma “distribuição de massa no espaço tridimensional”, em que essa distribuição configuraria os objetos, sendo que cada objeto macroscópico seria uma região de maior densidade. Outra possibilidade é que poderia se usar um conjunto de flashes para configurar um evento no espaço tridimensional (ibid.). Outra possibilida-

de de interpretação seria ver a função de onda como uma lei, representando o movimento das partículas e não como algo a ser imediatamente interpretado (p. 161).

Finalmente, a mecânica quântica pode ser vista como tendo elementos para uma visão holística, em que o todo é maior do que a soma das partes. Por outro lado, muitos são atraídos por um reducionismo, como David Lewis e sua superveniência humana, que diz que tudo que existe é um vasto mosaico de problemas locais (p. 166). Teller (1986) vai falar no holismo relacional, que define como “a posição em que dois indivíduos podem ter propriedades relacionais e não tem superveniência nas suas propriedades não relacionais” (Lewis, 2016, p. 167). Essa poderia ser justamente uma das definições de emergência. Como não é possível descrever a trajetória dos *spins* de maneira não relacional, podemos dizer que tanto a teoria do colapso espontâneo quanto o do multiverso, quanto a da variável oculta encarnam alguma forma de holismo (p. 170). Diante disso, a única maneira de recuperar a superveniência é uma abordagem retroativa da mecânica quântica (p. 172).

Schaffer (2010) sugere um monismo em que as propriedades não determinam o sistema, mas ao contrário, o sistema determina as propriedades das partes. Essa abordagem se chama monismo de prioridade (Lewis, 2016, p. 174). Teríamos apenas um sistema que incluiria as partículas, as posições e a propriedade (p. 174). Outra perspectiva seria a de pensar em compromissos metafísicos mais fracos, em que a subdeterminação não aparece nas entidades realizadas pelas estruturas. Essa é a teoria do realismo estrutural ôntico (OSR), proposta por Ladyman em 1998 (Lewis, 2016, p. 175). Nessa visão, as relações seriam o fundamento e os indivíduos seriam nós na estrutura relacional (p. 176).

Referências

ALBERT, David Z. *Quantum mechanics and experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.

ALLORI, Valia. Primitive ontology and the structure of fundamental physical theories. In: NEY, Alyssa; ALBERT, David Z. (orgs.). *The wave function*. Oxford: Oxford University Press, 2013, p. 58–75.

BARNES, Elizabeth; WILLIAMS, J. Robert G. A theory of metaphysical indeterminacy. In: BENNET, Karen; ZIMMERMAN, Dean (orgs.). *Oxford Studies in metaphysics*, v. 6. Oxford: Oxford University Press, 2011, p. 103–148.

BARRETT, Jeffrey A. *The quantum mechanics of minds and worlds*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

BAYM, Gordon. *Lectures on quantum mechanics*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1969.

EVERETT, Hugh, III. "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, College Park, MD, v. 29, n. 3, p. 454-462, 1957.

GHIRARDI, GianCarlo; GRASSI, Roberto; BENATTI, Fabio. Describing the macroscopic world: Closing the circle within the dynamical reduction program. *Foundations of Physics*, Berlin, v. 25, p. 5-38, 1995.

LADYMAN, James. What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 29, p. 409-424, 1998.

LEWIS, David. *On the plurality of worlds*. Oxford: Blackwell, 1986.

LEWIS, Peter J. *Quantum ontology: a guide to the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2016.

LOCKWOOD, Michael. *Mind, brain, and the quantum: the compound 'I'*. Hoboken, NJ: Blackwell, 1989.

MAUDLIN, Tim. The nature of the quantum state. In: NEY, Alyssa; ALBERT, David Z. (orgs.). *The wave function: Essays on the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2013, p. 126-153.

NEUMANN, John von. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer, 1932. – Translated as *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1955.

PRICE, Huw. *Time's arrow and Archimedes's point: New directions for the physics of time*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

SAUNDERS, Simon. Time, quantum mechanics, and decoherence. *Synthese*, Berlin, v. 102, n. 2, p. 235-266, 1995.

SAUNDERS, Simon; WALLACE, David. Branching and uncertainty. *British Journal for the Philosophy of Science*, Chicago, IL, v. 59, n. 3, p. 293-305, 2008.

SCHAFFER, Jonathan. Monism: The priority of the whole. *Philosophical Review*, Durham, NC, v. 119, n. 1, p. 31-76, 2010.

TELLER, Paul. Relational holism and quantum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, Chicago, IL, v. 37, n. 1, p. 71-81, 1986.

TYE, Michael. Vagueness and reality. *Philosophical Topics*, Berlin, v. 28, p. 195-209, 2000.