

Redefinindo a curvatura do arco: aspectos transcendentais da racionalidade quântica

Patrícia Kauark-Leite

UFMG

Na Doutrina Transcendental do Método, Kant utiliza a metáfora da esfera para simbolizar os limites e escopo da razão pura. Em suas próprias palavras:

“nossa razão não é, digamos, um campo indefinidamente estendido cujos limites só sejam conhecidos de maneira geral; ela tem antes ser comparada a uma esfera cujo raio pode ser calculado a partir da curvatura do arco sobre sua superfície (a partir da natureza das proposições sintéticas *a priori*), e cujo conteúdo e limitação também se podem obter com segurança a partir do raio. Fora dessa esfera (o campo da experiência), não há nada que seja um objeto para ela; e mesmo questões sobre supostos objetos fora dela só dizem respeito a princípios subjetivos de uma determinação completa das relações que podem, sob conceitos do entendimento, aparecer no interior dessa esfera.” (KrV, B790).

Com essa e também com outras metáforas similares, como é o caso da ilha e do oceano sem fim, Kant nos afigura quão fundamental é a função que a noção de limite [*Grenze*] desempenha no seu idealismo crítico. Kant faz da delimitação do espaço do saber científico, em comparação com o espaço ilimitado do pensamento especulativo, que pretende justamente alcançar o absolutamente incondicionado, um dos problemas centrais da atividade filosófica. Se julgamos que essa tarefa permanece ainda como um desafio para a investigação filosófica,

cabe-nos então investigar as novas condições de limitação impostas pelo saber científico atual. Como sabemos, Kant identifica o espaço do saber genuinamente científico àquele da física newtoniana. Não obstante essa especificidade de contexto, a epistemologia de Kant desempenhou um papel singular na interpretação de Copenhague da teoria quântica, mais particularmente na chamada interpretação complementar proposta por Niels Bohr. Se com Kant, a investigação dos limites do conhecimento era uma das tarefas que importava aos filósofos e não necessariamente aos cientistas, com Bohr e Heisenberg, ela se apresenta ao físico como uma condição intrínseca de sua atividade de pesquisa, como forma de interpretar os novos padrões de racionalidade introduzidos pela teoria. Propomos assim neste artigo, em primeiro lugar, avaliar a pertinência da perspectiva transcendental na análise da teoria quântica. A seguir procuraremos estabelecer as possíveis ligações entre o pensamento filosófico de Bohr e o de Kant, ressaltando em nossa análise a dissociação introduzida pelo princípio bohriano de complementaridade entre a intuição espaço-temporal e o princípio de causalidade. Em terceiro e último lugar, concluiremos pela defesa de uma perspectiva transcendental, não estritamente kantiana, a favor de condições *a priori* mais flexíveis.

1. PERTINÊNCIA DA PERSPECTIVA TRANSCENDENTAL NA ANÁLISE FILOSÓFICA DA TEORIA QUÂNTICA

A filosofia da ciência contemporânea é profundamente marcada por uma rejeição declarada das teses principais do idealismo transcendental kantiano. No texto seminal do manifesto do Círculo de Viena (1929), intitulado “A concepção científica do mundo: O Círculo de Viena”, Rudolf Carnap, Hans Hahn e Otto Neurath declaram ser a tese fundamental do empirismo moderno, precisamente, a recusa da possibilidade de qualquer conhecimento sintético *a priori*. Nos seus próprios dizeres: “a concepção científica do mundo admite apenas proposições empíricas sobre objetos de toda espécie e proposições analíticas da lógica e da matemática. Todos os partidários da concepção científica do mundo estão de acordo na recusa a metafísica, seja a declarada, seja a velada do apriorismo” (Carnap, Hahn, & Neurath, 1986, pp. 11-12). No debate que se seguiu, nas décadas seguintes, após a publicação do referido manifesto, que opôs realistas científicos, de um lado, e empiristas, de outro, considerou-se superadas as questões relativas ao apriorismo kantiano.

No entanto, um conjunto de publicações nos últimos anos reacendeu as discussões a respeito das condições transcendentais das teorias físicas no contexto do debate sobre os fundamentos da mecânica quântica. A filosofia kantiana aparece evocada como forma de resolver, ou melhor, dissolver os paradoxos epistêmicos trazidos por essa teoria física, que subverteu os cânones das doutrinas epistemológicas habitualmente aceitas. Sobre esse revigoramento do kantismo no âmbito da filosofia ciência, merece destaque o livro editado, em 2009, por Michel Bitbol, Jean Petitot e Pierre Kerszberg, *Constituting Objectivity: Transcendental Perspectives on Modern Physics*, como sinal de reconhecimento desse movimento de revalorização do idealismo transcendental no campo da análise da ciência.

Se a mecânica quântica revelou ou não novas condições *a priori* do conhecimento do mundo empírico é uma questão controversa. A chamada interpretação de Copenhague da teoria quântica, na versão originalmente defendida por Niels Bohr, é muitas vezes apresentada e discutida como representando uma posição eminentemente empirista (Cf. Peter Mittelstaedt, 1994, p. 120), ou na caracterização de Karl Popper (1989), como uma posição tipicamente instrumentalista ou positivista. Essa parece ser, entretanto, uma caracterização equivocada. Vejamos porque.

Segundo Bohr, os paradoxos epistêmicos da mecânica quântica estão relacionados a duas condições de limitação da nossa linguagem. A primeira resulta da incapacidade da linguagem ordinária em descrever uma realidade quântica inobservável, uma vez que as entidades nomeadas pela teoria não guardam nenhuma relação de referência. A segunda limitação refere-se ao fato de que, não obstante a primeira condição, todos os físicos em suas práticas experimentais e comunicativas, não podem prescindir da linguagem ordinária. Ela é usada tanto para descrever os resultados experimentais, que se apresentam como interligados espaço-temporalmente, quanto para comunicar as suas estratégias de investigação e os resultados obtidos para os outros membros da comunidade científica. A linguagem comum é, portanto, do ponto de vista teórico, incapaz de descrever os eventos atômicos, e, do ponto de vista pragmático, necessária para a prática de físicos.

Assim, segundo Bohr, se, por um lado, a teoria é formulada em uma linguagem matemática altamente abstrata que guarda pouca ou nenhuma relação com a linguagem comum, por outro lado, esta última não pode ser negligenciada. Ele considera que os conceitos da física clássica são essencialmente uma extensão dos conceitos comuns da nossa linguagem ordinária,

mesmo se eles são muito mais abstratos. Por expressarem grandezas que são empiricamente mensuráveis, são por meio dos conceitos clássicos que os físicos comunicam os resultados de suas práticas experimentais. Quando empregada no contexto da física quântica, a linguagem ordinária, no entanto, perde seu caráter representacional de descrição de propriedades intrínsecas do sistema quântico. Bohr identifica a principal raiz dos paradoxos quânticos no emprego não representacional da linguagem ordinária pelos físicos quânticos. Ao fazer isso, ele introduz dois tipos de descrição: uma representacional (clássica) e uma não representacional (quântica). Mas como compreender essa estratégia bohriana? As tentativas de compreensão realista, como se Bohr introduzisse também uma divisão entre dois mundos, um macrofísico (o mundo da física clássica) e outro microfísico (o mundo da física quântica), levam a contradições insuperáveis. Tentativas de compreensão estritamente empiristas ou instrumentalistas são, por outro lado, modestas para se alcançar a amplitude de seu pensamento. Nossa aposta metodológica é a de que o sentido da interpretação de Bohr melhor se revela em uma perspectiva transcendental. Essa é a terceira via entre as duas abordagens, realista e empirista, e que permite que os problemas epistemológicos da física contemporânea sejam melhor compreendidos. Mas como podemos reconciliar Bohr e Kant?

Em sua *Crítica da razão pura* e nos *Primeiros princípios metafísicos da ciência da natureza*, Kant tomou como paradigma de conhecimento legitimamente válido a física de Newton. Naturalmente, sob pena de um anacronismo indefensável, não podemos esperar que a doutrina kantiana se aplique inteiramente à física de Bohr. Assim, para que tal aplicação tenha alguma pertinência, é preciso considerar a filosofia kantiana da ciência não como fonte de verdades absolutas e incontestáveis, mas como um método de reflexão. Não é esse o propósito do neokantiano Hermann Cohen (2001) em sua interpretação do idealismo kantiano? A *Crítica da razão pura* se afigura fundamentalmente, segundo Cohen, como um tratado do método. Um método muito poderoso de análise que, no entanto, em nossa opinião, deve ser constantemente atualizado se consideramos que ele possa auxiliar no enfrentamento dos novos desafios colocados pela ciência contemporânea. Tomando a mecânica quântica como um fato para a razão reflexiva, cujo alcance e valor preditivo é bem superior e mais preciso do que a física clássica considerada por Kant, a atitude transcendental nos impele a investigar pelas condições de possibilidade dessa nova teoria. Vamos assim tentar delinear alguns aspectos da racionalidade quântica que nos permitem aproximá-la do idealismo transcendental.

2. CONVERGÊNCIAS ENTRE AS PERSPECTIVAS EPISTÊMICAS DE BOHR E KANT

Niels Bohr (1928) expôs pela primeira vez seu princípio de complementaridade em 1927, em um congresso em Como, na Itália. Esse foi também o ano em que Heisenberg (1983) publicou o seu artigo apresentando as relações de incerteza, que são matematicamente derivadas das relações de comutação do formalismo quântico e que podem ser expressas pelo famoso princípio de indeterminação. Porém, diferentemente deste, o princípio de complementaridade introduzido por Bohr não é um princípio matematicamente derivado, mas afigura-se como um princípio epistêmico geral, introduzido no interior da teoria física com a finalidade de fornecer uma interpretação coerente dos processos quânticos. Sua amplitude, no entanto, transcende os limites da teoria quântica. O próprio Bohr generalizou a ideia da complementaridade para outros domínios do conhecimento muito variados como o da psicologia (Bohr, 1939), da biologia (Bohr, 1937) e da antropologia (Bohr, 1939), analisando, por exemplo, as relações complementares entre a consciência e o cérebro, o instinto e a razão, a natureza e a cultura.

No contexto da mecânica quântica, entretanto, onde o conceito de complementaridade foi originalmente empregado, Bohr o considerava, por um lado, como base para a justificação das relações de incerteza de Heisenberg e, por outro lado, como uma consequência necessária de um outro princípio, que ele chamou de postulado quântico. Tal princípio, completamente estrangeiro às teorias clássicas, expressa a individualidade e a descontinuidade essencial dos fenômenos quânticos e permite justificar porque os conceitos da física clássica não são sem restrição aplicáveis ao domínio atômico. A possibilidade de descrever com o auxílio de certos conceitos clássicos uma dada situação experimental em física quântica exclui a aplicabilidade de outros conceitos clássicos que numa descrição clássica aplicavam-se simultaneamente à mesma situação. Pode-se efetuar uma caracterização espaço-temporal de um sistema quântico, medindo-se, por exemplo, a posição de uma partícula eletrônica num dado instante, mas não se pode, em revanche, determinar os valores da energia e da quantidade de movimento, que são necessários para caracterizar os processos causais do sistema por aplicação das respectivas leis de conservação. E vice-versa, se os valores da energia e quantidade de movimento forem determinados, a mesma coisa não pode ser feita em relação às medidas de posição e tempo. Da mesma forma, é impossível determinar o comportamento do sistema levando-se em conta simultaneamente os aspectos corpusculares e ondulatórios, que descrevem de forma comple-

mentar tanto o comportamento de um elétron, classicamente considerado uma partícula, como o comportamento da luz, classicamente caracterizada como uma onda. Assim tanto um elétron quanto um fóton de luz exibem quanticamente comportamento de partícula e de onda, que são descrições mutuamente excludentes a cada situação experimental específica. Para dar sentido a essa estranheza introduzida pela teoria quântica, Bohr considera que onda e partícula são conceitos clássicos que não descrevem realidade inobservável alguma, mas que são úteis para a descrição de situações experimentais, desde que sujeitos à aplicação do princípio de complementaridade. Dessa forma, as condições experimentais segundo as quais o sistema é susceptível de ser descrito como partícula excluem as condições experimentais segundo as quais ele é susceptível de ser descrito como onda.

Bohr chama assim essas possibilidades alternativas de descrição de *descrições complementares*. Elas são complementares num sentido muito particular. Elas se referem antes de tudo a uma relação de exclusão mútua entre dois aspectos que não se encontram jamais juntos em uma mesma descrição. E ao mesmo tempo, sendo esses aspectos mutuamente exclusivos a cada uma das duas descrições distintas, eles são ambos necessários para uma completa caracterização do sistema quântico. Se tais descrições fossem relativas a uma realidade objetiva independente do observador, como classicamente esperamos, era preciso lhes atribuir a posse simultânea de características contraditórias. As descrições clássicas em termos de onda ou de partícula não seriam aplicáveis por esse motivo a uma realidade exterior independente. Elas só podem se referir à maneira pela qual o fenômeno nos aparece em cada contexto experimental específico. É por isso que elas são aplicáveis de maneira complementar. De modo especial, Bohr considerou as relações de incerteza de Heisenberg como uma expressão de sua noção geral de complementaridade, segundo a qual nossa compreensão dos fenômenos atômicos se estabelece sobre a base de descrições complementares. Para ele, essa noção, essencialmente epistêmica, está para a mecânica quântica, assim como a noção de causalidade está para a mecânica clássica.

Assim, para Bohr, a contradição pode ser evitada se levamos em conta que essas descrições não se referem a uma realidade objetiva independente do observador, mas a um tipo bem especial de fenômeno, constituído pelo conjunto - sistema observado e instrumento de observação -, que não podem ser considerados independentemente um do outro. O que Bohr chama de fenômeno quântico tem um sentido eminentemente contextual, que depende das condições de observação. O fenômeno quântico não pode, portanto, ser separado dos meios pelos quais

nós o observamos. Ele é definido pelo conjunto dos resultados obtidos em circunstâncias experimentais bem definidas. Nas palavras de Bohr:

É certamente bem mais conforme à estrutura e à interpretação do simbolismo da mecânica quântica, e também aos princípios epistemológicos elementares, de reservar a palavra « fenômeno » à compreensão dos efeitos observados sob condições experimentais dadas. (Bohr, 1938, p. 24; BCW7, p. 316, tradução nossa)¹

O fenômeno quântico é portanto o resultado da interação entre o objeto físico e o dispositivo de medida em uma situação experimental concreta, expressa por termos de nossa linguagem ordinária :

Nessa situação, somos confrontados à necessidade de uma revisão radical dos fundamentos da descrição e da explicação dos fenômenos físicos. Aqui, é preciso sobretudo reconhecer que, por mais longe que os efeitos quânticos ultrapassem o alcance da análise da física clássica, o relato do arranjo experimental e o registro das observações devem sempre ser expressos em linguagem comum completada pela terminologia da física clássica. Isso é uma simples demanda lógica, uma vez que a palavra « experimento » pode apenas, em essência, ser utilizada em relação à situação onde podemos falar aos outros o que nós fizemos e o que nós aprendemos. (Bohr, 1948, p. 313; BCW7, p. 331, tradução nossa)²

Assim, o caráter clássico da descrição de uma situação experimental de um fenômeno que na realidade é quântico, cria uma ilusão de linguagem que nos impele a falar em termos

1 "It is certainly far more in accordance with the structure and interpretation of the quantum mechanical symbolism, as well as with elementary epistemological principles, to reserve the word "phenomenon" for the comprehension of the effects observed under given experimental conditions". (Bohr, 1938: 24; BCW7, 316)

2 "In this situation, we are faced with the necessity of a radical revision of the foundation for description and explanation of physical phenomena. Here, it must above all be recognized that, however far quantum effects transcend the scope of classical physical analysis, the account of the experimental arrangement and the record of the observations must always be expressed in common language supplemented with the terminology of classical physics. This is a simple logical demand, since the word "experiment" can in essence only be used in referring to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned". (Bohr, 1948, p. 313; BCW7, p. 331)

de objeto em si, detentor de propriedades intrínsecas independentes. Assim, no lugar de dizer: ‘a interação entre uma partícula e uma placa fotográfica teve como consequência uma mancha negra em um certo lugar sobre a placa’, renunciemos mencionar o aparelho e dizemos simplesmente: ‘a partícula foi encontrada em tal lugar’. O contexto experimental, mais do que a mudança ou a perturbação das propriedades preexistentes do objeto, define o que pode ser dito significativamente sobre o objeto.

Mesmo se tencionássemos descrever a interação entre o sistema e a aparelhagem de medição, não conseguiríamos, pois não podemos conhecer o que pertence propriamente a um e a outro. Contudo, toda tentativa de medir o efeito dessa interação efetuando novas medidas sobre uma quantidade observada diferente, produz sempre um novo fenômeno e somos de novo confrontados à mesma situação. Devido a essa interação não analisável, não podemos oferecer uma imagem descritiva simples e unificada do fenômeno quântico como um todo. As descrições dos resultados de diferentes medições para um sistema, que ilusoriamente se supõe ser o mesmo, só podem ser tomadas como complementares:

o postulado fundamental da indivisibilidade do quantum de ação (...), em razão da conexão entre os fenômenos e sua observação, nos força a adotar um novo modo de descrição designada como *complementar* no sentido de que qualquer aplicação de conceitos clássicos impossibilita o uso simultâneo de outros conceitos clássicos, igualmente necessários em outras circunstâncias para a explicação dos fenômenos. (Bohr, 1934, p. 10; BCW6, p. 288, trad. nossa)³

Além disso, a limitação introduzida pelo princípio de complementaridade não é superável. Isso quer dizer que não se pode simplesmente substituir esses conceitos clássicos por novos conceitos não-contraditórios, que sejam aplicáveis à realidade quântica, de forma a restaurar uma imagem harmônica do mundo. De acordo com Bohr, a descrição que podemos dar para qualquer arranjo experimental é sempre clássica. Essa condição limitativa seria inerente à nossa condição humana de seres de linguagem, que se comunicam por meio da linguagem ordinária-

3 “the fundamental postulate of the indivisibility of the quantum of action (...), because of the coupling between phenomena and their observation, forces us to adopt a new mode of description designated as complementary in the sense that any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts which in a different connection are equally necessary for the elucidation of the phenomena”. (Bohr, 1934: 10; BCW6, p. 288)

ria mesmo em contextos científicos tão adversos, como no caso da mecânica quântica. A idéia mesma de substituir os conceitos clássicos por outros melhores adaptados a descrever a nova situação, a fim de eliminar os paradoxos quânticos, é uma hipótese que, segundo Heisenberg “repousa sobre um malentendido”. De acordo com ele:

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

É interessante notar que Bohr anunciou de diferentes maneiras seu princípio de complementaridade nas discussões sobre os fundamentos da mecânica quântica. Algumas vezes ele o enunciou em termos de complementaridade entre duas formas clássicas de descrição do fenômeno físico: corpuscular e ondulatória. Ele também o apresentou como expressão da complementaridade em relação à incerteza na medição de grandezas físicas como a posição e a quantidade de movimento, ou tempo e energia. Contudo, uma formulação que nos interessa mais particularmente foi àquela anunciada em termos essencialmente kantianos. Foi essa última formulação que Bohr escolheu para apresentar pela primeira vez em público por ocasião de sua conferência em Como, falando da complementaridade entre duas formas de estruturação do conhecimento: a intuição espaço-temporal e o princípio de causalidade. Nas palavras de Bohr (2000, p. 136): o postulado quântico “implica uma renúncia com respeito à coordenação espaço-temporal causal de processos atômicos”. O nosso interesse neste trabalho é por essa definição epistêmica da complementaridade.

Na concepção de Bohr, a clivagem entre intuição e conceito tem uma aplicabilidade distinta se levamos em consideração os contextos clássico e quântico. Assim, na física clássica

temos uma conjunção entre a apresentação intuitiva do fenômeno no espaço e no tempo e sua definição conceitual dada pelo princípio de causalidade. Na teoria quântica, a conjunção é substituída pela disjunção seguinte: ou o fenômeno é apresentado na intuição espaço-temporal ou ele é conceitualmente descrito pelo princípio de causalidade. Heisenberg em seu livro *The physical principles of the quantum theory* exprime o caráter complementar entre a intuição espaço-temporal e o conceito de causalidade da seguinte forma :

“De fato, nossa descrição ordinária da natureza e a ideia de leis exatas repousam sobre a suposição de que é possível observar os fenômenos sem influenciá-los apreciavelmente. Associar uma causa determinada a um efeito determinado tem sentido apenas se ambos podem ser observados sem introduzir um elemento estrangeiro perturbando a inter-relação entre eles. A lei de causalidade, em razão de sua própria natureza, pode ser definida apenas para sistemas isolados, e na física atômica mesmo sistemas aproximadamente isolados não podem ser observados. Isso poderia ter sido previsto, pois na física atômica estamos lidando com entidades que são (tanto quanto sabemos) últimas e indivisíveis. Não há nenhuma intervenção infinitesimal com a ajuda da qual uma observação possa ser feita sem uma apreciável perturbação.

Por outro lado, um dos requisitos tradicionalmente impostos a uma teoria física é o de que todos os fenômenos devem ser explicados como relações entre objetos existindo no espaço e tempo. Esse requisito tem sofrido um gradual relaxamento no curso do desenvolvimento da física. (...) disso resulta que tal descrição dos processos atômicos exclui necessariamente a validade exata da lei da causalidade e vice-versa. Bohr assinalou que é portanto impossível exigir que ambos requerimentos sejam completamente preenchidos pela teoria quântica. Eles representam aspectos complementares e mutuamente exclusivos dos fenômenos atômicos” (Heisenberg, 1930, pp. 63-64, tradução nossa)⁴

4 In fact, our ordinary description of nature, and the idea of exact laws, rests on the assumption that it is possible to observe the phenomena without appreciably influencing them. To co-ordinate a definite cause to a definite effect has sense only when both can be observed without introducing a foreign element disturbing their interrelation. The law of causality, because of its very nature, can only be defined for isolated systems, and in atomic physics even approximately isolated systems cannot be observed. This might have been foreseen, for in atomic physics we are dealing with entities that are (so far as we know) ultimate and indivisible. There exist no infinitesimals by the aid of which an observation might be made without appreciable perturbation.

Second among the requirements traditionally imposed on a physical theory is that it must explain all pheno-

Assim, o princípio de complementaridade parece fixar um limite de validade à aplicação das noções *a priori* kantianas de espaço e tempo e de causalidade. Por um lado, a equação fundamental do formalismo da teoria quântica, a chamada equação de Schrödinger, exprime a evolução temporal causalmente determinista do estado quântico do sistema físico. Contudo, ela não pode ser associada, como acontece na física clássica, a uma evolução espaço-temporal do seu sistema físico, ou, em termos kantianos, ela não pode se apresentar *a priori* na intuição. Por outro lado, as representações intuitivas clássicas ligadas à intuição empírica não podem ser eliminadas. O princípio de complementaridade estabelece justamente um limite, por assim dizer, para o uso das imagens intuitivas nos fenômenos atômicos.

Vemos que esse modo de conceber a complementaridade, seja pela conjunção clássica, seja pela disjunção quântica entre a intuição espaço-temporal e o princípio de causalidade, mesmo se Bohr não faz menção ao nome de Kant, nos indica uma feição nitidamente kantiana na caracterização do problema. Como é sabido, o caráter necessário e *a priori* da física clássica tornou-se compreensível com Kant pela síntese entre intuição e conceitos. Uma síntese atribuída por Kant à imaginação transcendental a fim de tornar possível a ação do entendimento sobre a sensibilidade. Agora, diante da nova situação da mecânica quântica, Bohr propõe através da noção de complementaridade, uma limitação radical à noção mesma de síntese transcendental. Essa limitação atinge o coração da doutrina kantiana do esquematismo, visto que a exigência da composição simultânea dos dois elementos básicos da cognição (intuição mais conceitos) para constituir o objeto do conhecimento não mais se verifica. Contudo, utilizando os mesmos elementos kantianos, Bohr propõe uma outra espécie de síntese muito particular. Uma síntese, digamos, disjuntiva ou complementar, em que as duas exigências não podem estar presentes ao mesmo tempo, mas que são todas as duas necessárias para dar conta de maneira completa do processo quântico. Não há assim em Bohr uma renúncia ao princípio de causalidade ou à intuição espaço-temporal, como é frequentemente afirmado, mas uma renúncia à descrição simultaneamente causal e espaço-temporal dos fenômenos quânticos.

mena as relations between objects existing in space and time. This requirement has suffered gradual relaxation in the course of the development of physics. (...) it follows that such a description of atomic processes necessarily precludes the exact validity of the law of causality-and conversely. Bohr has pointed out that it is therefore impossible to demand that both requirements be fulfilled by the quantum theory. They represent complementary and mutually exclusive aspects of atomic phenomena. (Heisenberg, 1930, pp. 63-64).

Estamos diante do seguinte paradoxo: utilizamos conceitos clássicos intuitivos para descrever a situação experimental (macroscópica), mas que são ao mesmo tempo incapazes de uma descrição coerente ‘do que acontece realmente’ a nível microfísico. Dessa forma, apesar da necessidade do uso complementar e mutualmente exclusivo da intuição sensível e da categoria da causalidade, devemos abandonar completamente a esperança de utilizar, por um lado, a intuição espaço-temporal para descrever o que se passa no domínio do inobservável e, por outro, o princípio causal para descrever a situação da medição experimental.

No entanto, a aproximação que a princípio podia ser estabelecida entre Kant e Bohr, identificada no uso do vocabulário kantiano de termos como ‘intuição espaço-temporal’ e ‘princípio de causalidade’ na definição do seu princípio de complementaridade se afigura muito problemática. É a unidade mesma do esquematismo que se encontra rompida. Ora, o esquema transcendental representa bem a mediação entre o lado intelectual, aquele das categorias, e o lado sensível, aquele da intuição (Cf. Kant, KrV, A138/B177). Quando se dissocia o intelectual do sensível, ou o conceito da intuição, um golpe mortal é desferido nos pilares do idealismo transcendental kantiano. O edifício kantiano não se sustenta na medida em que se separam as duas condições transcendentais, como se tivéssemos do lado experimental, uma descrição intuitiva espaço-temporal, e do lado teórico formal, uma descrição causal determinista. Assim o programa visando estender a validade da filosofia de Kant a partir de uma limitação das condições de aplicação de seus princípios conduz a um certo número de confusões que é preciso esclarecer.

3. CONCLUSÃO OU O QUE RESTA DE KANT

Para caracterizar a ausência de causalidade nos processos de medida efetuadas sobre um sistema quântico, von Neumann, em seu importante livro *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, publicado em 1955, afirma que um salto acausal é produzido no sistema pela intervenção do observador. Von Neumann se serve da expressão *transformação acausal* para relacionar dois estados que têm naturezas epistêmicas absolutamente distintas : um estado que não está ligado a nenhuma percepção com um outro que se apresenta na percepção quando uma medida é efetuada. O primeiro é descrito por uma superposição de estados dinâmicos do sistema, que não pode ser dado a nenhuma intuição possível. Como na experiência de pensamento

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

Não queremos aqui entrar no mérito dessa interpretação de von Neumann para o problema tradicionalmente conhecido como o problema da medida. O que desejamos assinalar é o uso de um princípio filosófico, no caso o princípio de causalidade pela teoria quântica. Chamamos, no entanto, atenção para a confusão entre dois sentidos diferentes de causalidade. Um corresponde ao princípio filosófico geral segundo o qual toda mudança perceptível tem uma causa, ela também perceptível. O segundo sentido de causalidade é identificado com a evolução temporal contínua do estado dinâmico do sistema, probabilisticamente previsível, na ausência de toda intervenção externa. Dentro dessa segunda significação, a evolução cessa de ser causal a partir do momento em que o sistema é submetido a uma observação. Contudo, para nós, a questão que merece ser analisada é aquela de saber se a evolução do vetor de estado pode ser assimilada simplesmente à lei causal.

Gostaríamos, no entanto, de assinalar que no quadro da epistemologia kantiana, é bastante problemático falar de descrição dos fenômenos no espaço e tempo, no nível da sensibilidade, isolada do sistema de princípios do entendimento, do qual faz parte o princípio de causalidade. Não se pode esquecer que para a constituição do objeto da intuição em Kant, deve-se necessariamente considerar os dois princípios matemáticos do entendimento puro: os axiomas da intuição e as antecipações da percepção. Esses são os princípios que justificam a constituição de uma física matemática da natureza e que respondem à questão da possibilidade de uma descrição matemática da natureza.

Além disso, considerar uma lei matemática da física sem que ela seja passível de ser construída na intuição, parece ferir uma das premissas fundamentais da epistemologia kantiana sobre o conhecimento matemático. Como Kant enfatizou nos *Prolegômenos* :

“todo conhecimento matemático possui esta peculiaridade de ter de apresentar seu conceito primeiro na intuição e *a priori* e com isso não numa intuição empírica mas pura (...) Esta observação com relação à natureza da matemática dá-nos uma indicação sobre a primeira e suprema condição de sua possibilidade: deve haver um fundamento de uma *intuição pura qualquer* pela qual apresenta ela todos os seus conceitos em concreto e no estudo *a priori*, ou, como se denomina, poder construí-los” (Kant, 1984, p. 25; Prol., §7, AA 04: 281).

Seguimos Hermann Cohen (2001) em sua interpretação da *Crítica da Razão Pura*, para quem a estética transcendental é absolutamente ininteligível quando tomada isoladamente, sem levar em conta os princípios matemáticos do entendimento. De acordo com ele, o princípio que regula a evolução temporal contínua segundo o cálculo diferencial não é a segunda analogia, mas o princípio das antecipações da percepção. Apesar de sua importância crucial, esse princípio parece ter sido esquecido nas discussões epistemológicas da mecânica quântica, quando o aparato kantiano é evocado.

Por outro lado, não se pode esquecer que a causalidade enquanto segunda analogia da experiência deve sempre ter uma relação com a intuição. O princípio de sucessão cronológica seguindo a lei de causalidade é uma regra que intervém “sempre presente na percepção daquilo que acontece, e torna *necessária* a ordem das percepções que se seguem umas às outras (na apreensão desse fenômeno)” (Kant, KrV, B238). Assim considerar a equação de Schrödinger como exemplo de uma lei causal guarda para nós pouca ligação com o princípio de causalidade kantiano, que se aplica apenas para a sucessão na ordem das percepções. Fora do contexto experimental a segunda analogia perde sua força justificadora.

Diante disso, em que sentido a perspectiva transcendental pode ainda ser mantida?

Quando Kant se interroga sobre as condições transcendentais de possibilidade da física matemática, ele busca estabelecer os princípios constitutivos da objetividade do conhecimento do mundo físico. É de se esperar que essa atitude transcendental que Kant teve em relação à física clássica possa ser transposta para o contexto da física quântica. Nas discussões sobre a atual relevância da abordagem kantiana, as duas primeiras analogias da experiência, isto é, o princípio da conservação da substância e o princípio da causalidade, foram apontadas como sendo aqueles princípios que foram

desafiados pela mecânica quântica. Como vimos, a solução proposta por Bohr foi de fazer um uso complementar da intuição espaço-temporal e do princípio de causalidade. Para ele, as formas *a priori* da intuição, limitadas pelas relações de indeterminação, permanecem válidas nas condições experimentais, onde os fenômenos são apresentados no espaço e no tempo. E, por sua vez, o princípio da causalidade tem sua função limitada, mas ainda permanece válido, sob a forma da equação de Schrödinger, que não guarda nenhuma ligação com qualquer descrição intuitiva espaço-temporal. No entanto, numa perspectiva kantiana, essa identificação do princípio da causalidade com a equação diferencial que evolui no tempo deterministicamente nos parece insustentável. O que para nós foi realmente desafiado na perspectiva de interpretação de Bohr foi o princípio das antecipações da percepção mais do que o próprio princípio de causalidade. Hermann Cohen considera tal princípio como o fundamento do método transcendental. Segundo ele, Kant tentou traduzir nesse princípio a ideia do cálculo diferencial como um instrumento matemático que permite antecipar uma percepção que ainda não ocorreu.

Se de fato o fundamento do método transcendental foi solapado pela nova física, qual o sentido de continuarmos ainda a defender a atualidade de tal perspectiva? A sugestão apresentada por Cassirer (1956) foi a de encontrar novos *a priori* condizentes com o estado atual da investigação física. Essa sugestão vai de encontro ao fixismo das formas *a priori* kantianas, em favor da adoção de estruturas *a priori* flexíveis, historicamente condicionadas, capazes de justificar a nova situação imposta pela mecânica quântica. No entanto, diante de um *a priori* assim tão transfigurado, não seria mais coerente a adoção da posição empirista de total rejeição da perspectiva transcendental, a favor de uma perspectiva convencionalista? Com efeito, por um lado, para mantermos a coerência do idealismo kantiano, não podemos conceder que juízos sintéticos *a priori* sejam empiricamente refutados e, por outro lado, devemos reconhecer que a física atual parece negar alguns deles. Logo, por que não concordar com os empiristas lógicos, que afirmam existir apenas dois tipos possíveis de juízos (analíticos *a priori* e sintéticos *a posteriori*) ou com o naturalismo de Quine que nega a possibilidade de se fazer tal distinção entre *a priori* e *a posteriori* (ou entre analítico e sintético) e admitir que tal categoria de juízos realmente não existe?

No entanto, trabalhos de alguns teóricos da mecânica quântica, como os de von Weizsäcker (1980) e Michel Bitbol (1998, 2000a, 2000b, 2005), mostram que novos sintético *a priori* são possíveis na mecânica quântica. Para além das convenções puramente arbitrárias, vemos emergir pela análise transcendental, alguns princípios de caráter mais geral que se apresentam como pré-condições que tornam a nossa experiência física do mundo possível. São os casos, por exemplo, do princípio de complementaridade ou da princípio de simetria. O pressuposto assumido é o de que significado do transcendental não deve ser opaco à historicidade de nosso conhecimento.

No entanto, dentro da perspectiva de relativização dos princípios *a priori*, proposta por Cassirer (1956), consideramos um passo a mais em direção à pragmatização do *a priori* deve ser feito. Isto implica, assumindo a interpretação proposta por Bohr, que a dimensão performativa da linguagem deve ser levada em conta se quisermos compreender os paradoxos da mecânica quântica. Em nossa opinião, essa dimensão performativa, muitas vezes esquecida nas análises epistemológicas, se mostra frutuosa para se interpretar o papel complementar dos conceitos teóricos da mecânica quântica em contextos experimentais definidos.

Resta-nos brevemente indicar o que é novo e original na abordagem pragmático-transcendental em relação a outras abordagens transcendentais, que nos permitiria redefinir a curvatura do arco da nossa razão, no sentido da metáfora proposta por Kant. Assim vejamos. Contextualmente dependente das condições de observação, o conhecimento físico do mundo pretende a um nível constitutivo, reconstruir o fenômeno em sua estrutura lógico-matemática. No entanto, a racionalidade lógico-matemática não é suficiente. Ela supõe sempre o plano discursivo, isto é, o plano da linguagem ordinária, à luz do qual o conhecimento é comunicado. Considerando que a linguagem ordinária é parte essencial da prática linguística dos cientistas em seu esforço de comunicar os resultados obtidos na prática experimental, um novo sentido de objetividade física deve ser considerado. Uma objetividade não mais subjetivamente determinada por uma consciência universal, como pensava Kant, mas intersubjetivamente limitada pelos contextos teórico-experimentais que devem sempre ser comunicados. No caso da mecânica quântica, isso foi claramente evidenciado por Bohr. Um dos significados do seu princípio de complementaridade reside na ideia de que a atividade de compreensão teórico-experimental não pode ser separada da de comunicação dos resultados obtidos. Ambas as atividades devem ser consideradas como parte de um processo de interpretação, onde os símbolos puramente formais estão

relacionados a conceitos subordinados tanto ao ato experimental de medição quanto ao ato de fala. Assim a nossa aposta é a de que novos princípios transcendentais devem ser encontrados não somente no plano constitutivo da experiência, mas também no plano performativo, onde os enunciados constitutivos são proferidos na expectativa de um acordo intersubjetivo.

Referências Bibliográficas

Bitbol, M. (1998). Some Steps Towards a Transcendental Deduction of Quantum Mechanics. *Philosophia Naturalis*, 35, 253–280.

Bitbol, M. (2000a). Relations, Synthèses, Arrière-Plans; sur la philosophie transcendantale et la physique modern. *Archives de Philosophie*, 63, 595–620.

Bitbol, M. (2000b). Arguments transcendants en physique moderne. In S. Chauvier & F. Capeillères (Eds.), *La querelle des arguments transcendants*, *Revue philosophique universitaire de Caen*, 35, 81–101.

Bitbol, M. (2005). Anticiper l'unité: une méthode de connaissance. In M. Cazenave (Ed.), *Unité du monde, unité de l'être*. Paris: Dervy.

Bitbol, M., Kerszberg, P., & Petitot, J. (Eds.). (2009). *Constituting Objectivity: Transcendental Perspectives on Modern Physics*. Berlin: Springer.

Bohr, N. (1928). The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature (suppl.)*, 121, 580-590 (Reimpresso em *BCW6*, Bohr, 1934, pp. 147-158)

Bohr, N. (1934a). *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge : Camb. Univ. Press.

Bohr, N. (1934b). Introductory Survey (1929). In *Atomic Theory and the Description of Nature* (pp. 1-24). Cambridge: Camb. Univ. Press. (*BCW6*, pp. 279-302).

Bohr, N. (1937). Biology and atomic physics. *Nuovo Cimento*, 15, 429-438.

Bohr, N. (1938). The causality problem in atomic physics. In *New Theories in Physics*, (pp. 11-30). Warsaw: Conference organized in collaboration with the International Union of Physics and the Polish Intellectual Co-operation Committee. (*BCW7*, pp. 303-322).

- Bohr, N. (1939). Natural philosophy and human culture. *Nature*, 143, 268-272.
- Bohr, N. (1948). On the notions of causality and complementarity. *Dialectica*, 2(3/4), 312-319. (BCW 7, pp. 325-337).
- Bohr, N. (1958). *Atomic physics and human knowledge*. New York: J. Wiley & Sons.
- Bohr, N. (1985). *Collected Works 6: Foundations of quantum physics I (1926 – 1932)*. (J. Kalckar, Ed.). Amsterdam: North-Holland. [BCW6]
- Bohr, N. (1995). *Física atômica e conhecimento humano: Ensaio 1932-1957*. (V. Ribeiro, Trad.). Rio de Janeiro: Contraponto. (Publicado originalmente em 1958)
- Bohr, N. (1996). *Collected Works 7 : Foundations of Quantum Mechanics II. (1933-1958)*. (J. Kalckar, Ed.). Amsterdam: Elsevier. [BCW7]
- Bohr, N. (2000). O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica. (O. Pessoa Jr., Trad.). In O. Pessoa Jr. (Ed.), *Fundamentos da Física 1 - Simpósio David Bohm* (pp. 135-158). São Paulo: Editora da Livraria da Física. (Publicado originalmente em 1928).
- Carnap, R., Hahn, H., & Neurath, O. (1986). A concepção científica do mundo – O Círculo de Viena (F. P. A. Fleck, Trad.). *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10, 5-20. (Publicado originalmente em 1929).
- Cassirer, E. (1956). *Determinism and Indeterminism in Modern Physics: Historical and Systematic Studies of the Problem of Causality*. (O. T. Benfey, Trans.). New Haven: Yale University Press. (Publicado originalmente em 1936)
- Cohen, H. (2001). *La théorie kantienne de l'expérience*. (E. Dufour & J. Servois, Trans.). Paris: Les éditions du Cerf. (Publicado originalmente em 1871/1885)
- Heisenberg, W. (1930). *The physical principles of the quantum theory*. (C. Eckart & F. C. Hoyt, Trans.). Chicago: The University of Chicago Press. (Publicado originalmente em 1930).
- Heisenberg, W. (1983). The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics. In J. A. Wheeler & H. Zurek (Eds), *Quantum Theory and Measurement* (pp. 62–84). Princeton : Princeton Univ. Press. (Publicado originalmente em 1927)
- Heisenberg, W. (1987). *Física e Filosofia*. (J. L. Ferreira, Trad.). Brasília: Editora UnB. (Publicado originalmente em 1958)

Kant, I. (1984). Prolegômenos. (T. M. Bernkopf, Trad.). In *Kant: Textos selecionados*. São Paulo: Abril Cultural. (Publicado originalmente em 1783, ProI, AA 04: 253-383).

Kant, I. (1990). *Primeiros princípios metafísicos da ciência da natureza*. Trad. Artur Morão. Lisboa: Edições 70, 1990 (Publicado originalmente em 1786, MAN, AA 04: 465-565).

Kant, I. (2013). *Crítica da razão pura*. (F. C. Mattos, Trad.). Petrópolis: Vozes; Bragança Paulista: Editora Universitária São Francisco. (Publicado originalmente em 1781, 1ª ed. (A), KrV, AA 04: 1-252; e em 1787, 2ª ed. (B), KrV, AA 03)

Kauark-Leite, P. (2009). The Transcendental Role of the Principle of Anticipations of Perception in Quantum Mechanics. In M. Bitbol, P. Kerszberg & J. Petitot (Eds.), *Constituting Objectivity: Transcendental Perspectives on Modern Physics* (pp. 203-213). Berlin: Springer.

Kauark-Leite, P. (2010). Transcendental philosophy and quantum physics. *Manuscrito: Rev. Int. Phil.*, 33 (1), 243-267.

Kauark-Leite, P. (2010). Classical Reason and Quantum Rationality: Transcendental Philosophy Face Contemporary Physics. In W. Bryuschinkin (Ed.), *Klassische Vernunft und Herausforderungen der modernen Zivilisation, Bd.2* (pp. 237- 246). Kaliningrad: Baltische Föderale Immanuel-Kant-Universität.

Kauark-Leite, P. (2012). *Théorie quantique et philosophie transcendantale : dialogues possibles*. Paris: Éditions Hermann.

Mittelstaedt, P. (1994). The Constitution of Objects in Kant's Philosophy and in Modern Physics. In P. Parrini (Ed.), *Kant and Contemporary Epistemology*. Dordrecht: Kluwer.

Popper, K. (1989). *A Teoria dos Quanta e o Cisma na Física. Pós-Escrito à Lógica da Descoberta Científica - Volume III*. (N. F. Fonseca, Trad.). Lisboa: Dom Quixote. (Publicado originalmente em 1982).

Scheibe, E. (1973). *The logical analysis of quantum mechanics*. (J.B. Sykes, Trans.). Oxford: Pergamon Press.

Von Neumann, J. (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. (R.Beyer, Trans.). Princeton: Princeton University Press. (Publicado originalmente em 1932).

Von Weizsäcker, C. F. (1980). *The Unity of Nature*. (F. J. Zucker, Trans.). New York: Farrar-Straus-Giroux. (Publicado originalmente em 1971).

ABSTRACT

This paper aims to discuss, from a Kantian perspective, some of the limit conditions imposed by quantum theory on the use of human reason in relation to the way our cognition shapes reality.

Keywords: *quantum theory, Kant, Bohr, transcendental philosophy, complementarity, space-time intuition, causality.*

RESUMO

Este trabalho se propõe a discutir, a partir de uma perspectiva kantiana, algumas das condições de limitação impostas pela teoria quântica à razão humana em relação à forma com a qual nosso conhecimento molda a realidade.

Palavras chave: *teoria quântica, Kant, Bohr, filosofia transcendental, complementaridade, intuição espaço-temporal, causalidade*