



# Causalidade e teoria quântica

*Patrícia KAUARK LEITE*



## RESUMO

O desenvolvimento da teoria quântica, na primeira metade do século passado, acendeu um debate acalorado entre filósofos e físicos sobre a natureza das leis físicas e, em especial, sobre a validade do princípio de causalidade. Tendo em vista a teoria de Planck sobre a radiação, a interpretação probabilista de Max Born, as relações de incerteza de Heisenberg e o princípio de complementaridade de Bohr, muitos físicos colocaram em dúvida a causalidade clássica, cuja legitimidade parecia a princípio não mais estar assegurada no domínio quântico. O objetivo deste artigo é apresentar e discutir as diferentes posições em torno desse debate. Serão analisados, além dos argumentos levantados pelos intérpretes de Copenhague, aqueles sustentados por neopositivistas e neokantianos. Procuraremos mostrar que, a despeito dos antagonismos filosóficos, a posição adotada por Schlick nesse debate parece estar mais próxima de Cassirer do que de seu colaborador Reichenbach.

**PALAVRAS-CHAVE** • Causalidade. Mecânica quântica. Neopositivismo. Neokantismo. Interpretação de Copenhague.

## INTRODUÇÃO

A análise das implicações filosóficas da mecânica quântica revelou desde o início dois resultados aparentemente contraditórios em relação à aplicabilidade de leis causais. Por um lado, constata-se que a previsibilidade de eventos futuros é, em princípio, impossível de ser calculada de maneira determinista. Por outro lado, o formalismo da mecânica quântica não permite indicar, para uma dada situação de medida experimental, as causas que necessariamente antecederam o acontecimento. Como então tornar compatível o indeterminismo e o caráter probabilista da teoria quântica com a universalidade e necessidade do princípio de causa e efeito?

Diante de tal situação, os neopositivistas assumiram uma posição mais cética sobre a aplicabilidade do princípio da causalidade aos processos microfísicos, ao passo que os neokantianos adotaram um conservadorismo epistêmico face à validade de tal princípio, procurando explicitar as limitações na sua aplicabilidade. Este artigo procurará, assim, mostrar que a controvérsia em torno do princípio de causalidade na física contemporânea foi permeada de mal-entendidos, primeiro, relativos à indistinção

entre os sentidos ontológico e epistêmico do princípio; segundo, relativos à identificação entre a causalidade e o determinismo e, terceiro, concernentes a uma falsa dupla oposição entre a probabilidade e a causalidade e entre a complementaridade e a causalidade. As posições de Russell (1913) e dos neopositivistas Schlick (1979 [1931], 1949 [1932]), e Reichenbach (1944) nesse debate serão contrastadas àquelas adotadas pelos neokantianos Hermann (1996 [1935]) e Cassirer (1956 [1937]). Procurar-se-á também evidenciar as perspectivas assumidas por alguns dos fundadores da mecânica quântica nesse debate, em particular Planck (1963 [1936]), Born (1926a, 1926b, 1929, 1949), Bohr (1983 [1928], 1938, 1948, 1958) e Heisenberg (1983 [1927], 1949 [1930], 1996 [1969]). A intenção é explicitar o sentido das afirmações pronunciadas em diferentes ocasiões por muitos deles acerca da compatibilidade do princípio de causalidade com a teoria quântica.

## I A CAUSALIDADE EM QUESTÃO PELOS EMPIRISTAS LÓGICOS

Antes mesmo do desenvolvimento do formalismo matemático da teoria quântica e, portanto, antes do florescimento dos debates filosóficos sobre a interpretação desse formalismo, Bertrand Russell já anunciava, em 1912/1913, com mais de uma década de antecedência, que a lei de causalidade, tal como a monarquia, era uma relíquia do passado, que só sobrevivia porque supostamente não causava mal algum. Nesse artigo sobre a noção de causa, Russell argumenta que sendo totalmente desnecessária para a ciência, tal noção deveria ser eliminada. No âmbito das teorias científicas, não há nada que possamos identificar, segundo ele (cf. Russell, 1912-1913, p. 13-4), como causa ou efeito. Uma lei física nada mais é do que uma equação diferencial, que estabelece as relações funcionais entre os eventos, sem nenhuma direção temporal privilegiada. Um evento *A*, determinante, pode situar-se temporalmente em relação a outro evento *B* antes, depois, ou até no mesmo tempo. Não há sentido em afirmar que um efeito (evento *B*) segue-se necessariamente de uma causa (evento *A*). Russell tem em mente a reversibilidade clássica das leis físicas do movimento, as quais aparecem para ele como fatos empíricos, sem implicarem, portanto, qualquer necessidade e sem corresponderem a nenhuma categoria *a priori*.

Os textos clássicos de Schlick (1979 [1931]) e Reichenbach (1978 [1925], 1978 [1931], 1944, 1956) sobre a causalidade inscrevem-se já no contexto do debate em torno da validade de tal noção filosófica face aos problemas levantados pelo princípio de indeterminação de Heisenberg e pela interpretação probabilista de Max Born. Em seu texto de 1931, sobre a causalidade na física atual, Schlick, diferentemente de Russell,

não negará a validade do enunciado causal, mas procurará enquadrá-lo em uma concepção compatível, ao mesmo tempo, com o critério empirista de significado e com as consequências epistêmicas da teoria quântica. Para Schlick (cf. 1979 [1931], p. 179), se há uma ordem de eventos que ocorrem em uma direção temporal há, por conseguinte, uma relação causal. Somente o caos, que nada mais é do que a ausência de lei e regularidade, pode ser descrito como uma ocorrência não causal. Se a causalidade tem significado, este deve residir na possibilidade da relação causal estabelecida ser verificada na experiência. Assim, ele afirma que “o verdadeiro critério da regularidade, marca essencial da causalidade, é o cumprimento das previsões” (Schlick, 1979 [1931], p. 185). E, em outro momento do texto, ele esclarece que “a verificação, como confirmação na experiência do cumprimento de uma previsão, é, portanto, o critério de causalidade *per se* e esse é o sentido prático, no qual é possível falar de teste de uma lei” (p. 188). Schlick identifica assim, nesse clássico texto de 1931, o princípio de causalidade com o princípio de determinismo. Afirmar que “*A causa B*” é o mesmo que dizer “*A determina B*”, ou que “*B se calcula a partir de A*”. O termo “determinado” significa o mesmo que “previsível” ou “susceptível de ser calculado”. Se pudermos prever um acontecimento com base em uma lei, isso significa que ela tem validade e significação. No entanto, a teoria quântica é uma teoria probabilista e intrinsecamente indeterminista. De que forma, então, podemos manter a validade do princípio causal?

Para Schlick, a grande contribuição da teoria quântica para a elucidação do problema da causalidade não foi ter tornado inválido o enunciado causal, nem ter introduzido a dimensão probabilista da função que descreve o comportamento do sistema. O que, de fato, a física contemporânea estabeleceu foi um limite para a exatidão das previsões das leis causais (cf. Schlick, 1979 [1931], p. 190-1). Assim, não é o caso de afirmar que o princípio de causalidade é falso ou inválido, como declarou Heisenberg, em 1927, em seu célebre artigo sobre as relações de indeterminação, nem que ele seja vazio de sentido ou inexpressivo, como afirmou Max Born, em sua conferência sobre o significado das teorias físicas em Göttingen, 1928, publicada em 1929. Para Schlick, um princípio é falso ou verdadeiro e, nesse sentido, válido ou inválido, apenas se for uma proposição empírica, cuja verdade ou falsidade pode ser constatada pela observação da natureza. Não é o caso do princípio de causalidade, uma vez que a proposição “todos os acontecimentos são em princípio passíveis de previsão” não é empiricamente verificável. Por outro lado, tampouco poderíamos considerá-lo como um juízo analítico ou *a priori*. Como, para Schlick, não existem juízos sintéticos *a priori*, se a proposição causal fosse *a priori*, ela seria um juízo analítico e, portanto, uma tautologia sujeita à regra de não contradição. Se assim fosse, determinismo e indeterminismo seriam princípios opostos e contraditórios e, por conseguinte, um dos dois deveria ser eliminado.

A solução defendida por Schlick é a de considerar a causalidade como uma “decisão” que expressa “uma exigência de sempre ir à procura das causas” (Schlick, 1979 [1931], p. 193-4). Nesse caso, o princípio da causalidade não seria nem verdadeiro, nem falso, nem com ou sem sentido, mas adequado ou inadequado, útil ou inútil. Há processos naturais que não seguem nenhuma regra, nenhuma lei e, por isso, não são considerados casuais. A aplicação do princípio de causalidade, nesses casos, é inútil ou inadequada. No caso da mecânica quântica de Schrödinger e da interpretação probabilista formulada por Max Born (1926a, 1926b) e, da mesma forma, na teoria cinética dos gases, estamos diante de uma limitação do princípio de causalidade. Não estamos lidando com uma lei causal em sentido rigoroso, mas com uma lei estatística, que expressa uma regularidade imperfeita. Uma lei estatística mescla a rigorosa causalidade natural com o mero acaso, como se fossem dois componentes de uma espécie de resultante, que seria a própria lei estatística. Como exemplifica Schlick, “uma lei rigorosa é aquela na qual, em média, *B* segue *A*, em 99 de 100 casos, e é absolutamente fortuito como 1% dos casos desviantes são atribuídos sobre o número total” (Schlick, 1979 [1931], p. 199).

Em uma perspectiva empirista, que é distinta da de Schlick, Reichenbach (1944), em um trabalho sobre os fundamentos filosóficos da mecânica quântica, opta por distinguir duas espécies de leis para caracterizar separadamente o determinismo clássico do indeterminismo quântico, a saber, as leis causais das leis probabilistas. Ele, assim, chama de leis temporalmente dirigidas (*temporally directed laws*) às leis da física clássica que estabelecem os nexos causais entre eventos e entidades ao longo do tempo, permitindo previsões fixas. Segundo Reichenbach, “se valores simultâneos de diferentes entidades são vistos como dependentes um do outro, essa dependência é sempre construída como derivável de *leis temporalmente dirigidas*” (1944, p. 3-4). Nesse caso, é razoável supor a existência de uma causa comum, agindo sobre os diversos indicadores de um determinado sistema físico. Associamos, por exemplo, a queda no ponteiro de um barômetro e o declínio da marcação de um termômetro a uma causa comum, identificada pela presença de uma massa de ar frio. Ou seja, a mesma causa provoca a variação simultânea na marcação dos dois indicadores.

Por outro lado, há certos tipos de eventos para os quais os valores das variáveis físicas simultaneamente conectadas não são redutíveis a uma causa comum. Esses eventos são expressos por outro tipo de lei, que Reichenbach (1944, p. 4) classifica como leis de corte transversal (*cross-section laws*), nas quais as informações das variáveis envolvidas são coletadas em um instante de tempo, sem que se saiba o que ocorreu antes desse instante. As relações de indeterminação de Heisenberg são, para Reichenbach, exemplo desse tipo de lei. A característica fundamental dessas leis está associada, segundo Reichenbach (p. 4), à limitação da mensurabilidade. Assim os valores si-

multêneos de parâmetros independentes não podem ser mensurados com a precisão desejada. Portanto, se há uma incerteza na precisão desses valores, não podemos fazer previsões estritas de observações futuras. Para ele, de acordo com o critério empirista do significado, a afirmação de que há uma lei causal por detrás da lei estatística é vazia e sem sentido; ele não pode ser convertida em nenhuma relação entre dados observacionais. É por isso que para ele o princípio de causalidade não faz nenhum sentido na mecânica quântica.

Para eliminar as anomalias que surgem quando se pretende extrapolar o uso do princípio de causalidade e o emprego de uma lógica bivalente, cuja validade se restringe ao domínio clássico, Reichenbach se vê obrigado a desenvolver uma lógica trivalente. Ao lado dos valores de verdadeiro e falso, é preciso considerar o valor de indeterminado. Só assim, segundo ele, seriam eliminadas as contradições resultantes do emprego de descrições contraditórias, como a corpuscular e a ondulatória, e incorporadas, nessa dimensão epistêmica, as relações de incerteza de Heisenberg e a interpretação probabilista da função de onda.

Vejam agora como esse debate estava sendo acompanhado pelos físicos defensores da interpretação de Copenhague.

## 2 A CAUSALIDADE EM QUESTÃO

### ENTRE OS FÍSICOS ADEPTOS DA INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE

Max Planck se propôs em muitas de suas conferências publicadas em forma de artigo a discutir a validade do princípio de causalidade para a teoria quântica. Apesar de admitir, para o mundo dos átomos, o fracasso da aplicação do princípio, sob sua forma clássica, ele irá defender a necessidade de redefinição do conceito de causalidade de forma a tornar inteligível a teoria quântica. Em seu artigo, publicado originalmente em 1936, Planck defende a ideia de que se há algum tipo de lei conectando dois eventos consecutivos, existe então uma conexão causal entre eles. E a melhor forma de atestar a existência da conexão causal é a possibilidade de prever um evento a partir da ocorrência de outro (cf. Planck, 1963 [1936], p. 48). Planck identifica, como Schlick, o princípio de causalidade com o de determinismo, adotando a seguinte definição: “um evento é causalmente condicionado, quando puder ser predito com certeza” (p. 47-48). Esse ponto de partida, Planck não vai abandonar. Mesmo diante da teoria quântica, ele se posiciona contra alguns indeterministas que se sentiram autorizados a eliminar em definitivo o princípio de causalidade. Planck não nomeia quem seriam esses indeterministas, mas propõe chamar por esse termo todos os físicos e filósofos que “mantêm que não há causalidade genuína ou lei na natureza e que a ilusão de sua existência é

devido ao fato da ocorrência de certas regras que são muito aproximadamente válidas, mas nunca absolutamente” (Planck, 1963 [1936], p. 50).

Para sair do impasse entre a definição adotada do princípio de causalidade e a situação imposta pela teoria quântica, Planck propõe a distinção entre as grandezas do mundo sensível, diretamente percebidas pelos órgãos dos sentidos, e as grandezas de mesmo nome pertencentes à “imagem do mundo físico” (cf. Planck, 1963 [1936], p. 54-5). No primeiro caso, as grandezas são mensuráveis e, portanto, sujeitas à imprecisão do processo de medida. No segundo caso, elas fazem parte de um modelo idealizado e são, por conseguinte, definidas de maneira absolutamente precisa. Por essa razão, as grandezas diretamente observáveis não fazem parte da “imagem do mundo físico”. No entanto, a previsão dos acontecimentos do mundo sensível carrega sempre graus diversos de indeterminação, ao passo que as leis, que regem a “imagem do mundo físico”, são sempre determinadas por uma estrita causalidade.

No caso específico da mecânica quântica, as relações de incerteza de Heisenberg estabelecem a impossibilidade de efetuar-se a medida simultânea da posição e da quantidade de movimento (cf. Heisenberg, 1983 [1927], p. 64). No entanto, essa impossibilidade não pode ser creditada ao princípio de causalidade. Tal como se passa na mecânica clássica, a função de onda quântica continua absolutamente determinada. Seu valor pode ser calculado segundo regras absolutamente precisas, seja através dos formalismos de Schrödinger, de Heisenberg ou de Dirac. Planck se vê na tarefa de restabelecer o determinismo estrito compatível com a existência do *quantum* de ação. Para ele (cf. Planck, 1963 [1936], p. 65), o determinismo que reina na teoria quântica é tão rigoroso quanto o da física clássica. Os cálculos é que são diferentes. O problema na nova imagem representativa do universo quântico reside na impossibilidade de fazer uma correspondência rigorosa e precisa entre a imagem física representativa do universo e o mundo sensível. Com isso, o ponto de partida assumido por Planck é mantido. Nesse sentido, Planck defende que a causalidade tal como foi definida “é perfeitamente compatível com a física moderna, embora sua necessidade não possa ser demonstrada nem *a priori* nem *a posteriori*” (Planck, 1963 [1936], p. 73). Não sendo nem falsa, nem verdadeira, ela é um dos mais fundamentais princípios heurísticos para indicar, como uma bússola, um caminho aos cientistas em meio à confusão dos eventos.

A restrição da lei de causalidade expressa por Planck em sua conferência originalmente publicada em 1932, já havia sido proposta em 1927 por Niels Bohr, por ocasião do Congresso Internacional de Física, em Como, na Itália. O físico dinamarquês, no entanto, recusa associar o comportamento causal e determinista do formalismo quântico a uma imagem representativa do universo microscópico, como propôs Planck. Bohr, aliás, nega a validade de qualquer descrição espaço-temporal das leis matemáticas, necessária para compor uma imagem representativa. Essa incompatibilidade en-

tre a descrição espaço-temporal, própria para narrar os fenômenos observáveis, e o determinismo causal do formalismo matemático está na base da sua original interpretação em que introduz a noção de complementaridade.

Ao longo de quatro décadas, como podemos acompanhar em seus artigos publicados, Bohr (cf. 1983 [1928], 1938, 1948, 1958) não cessará de enfatizar que a descrição pictórica e determinista das teorias da física clássica é uma idealização válida apenas para as situações em que há uma completa independência entre os fenômenos observados e os instrumentos de medida. A impossibilidade de uma nítida separação entre o comportamento dos objetos e os meios de observação é uma consequência do princípio descoberto por Planck da existência de um *quantum* de ação. Tal impossibilidade serve para definir as condições em relação às quais a causalidade clássica, como princípio epistêmico da explicação, não mais se aplica, e a imprecisão nas medições das variáveis conjugadas não pode ser negligenciada.

Heisenberg (1983 [1927]) negou qualquer valor ao princípio de causalidade. Dois anos mais tarde, em suas conferências na Universidade de Chicago, publicadas em 1930, adere à interpretação de Bohr de tal princípio (cf. Heisenberg, 1949 [1930]). Ele passa a considerar uma validade restrita do princípio de causalidade no contexto da teoria quântica, exprimindo, como Bohr, o caráter complementar, mutuamente excludente, entre a descrição espaço-temporal dos eventos observáveis e a lei de causalidade expressa pelo formalismo quântico (Heisenberg, 1949 [1930], p. 65).

Assim, tanto Bohr como Heisenberg admitem uma limitação, fixada pelo princípio de complementaridade, na aplicação das noções de espaço, de tempo e de causalidade. Se, por um lado, eles reconheciam a impossibilidade de qualquer descrição intuitiva dos eventos atômicos, por outro lado, eles afirmam a impossibilidade de eliminar totalmente as representações intuitivas clássicas. O princípio de complementaridade define, assim, justamente o lugar das imagens intuitivas e do determinismo causal.

O principal autor da interpretação estatística da mecânica quântica, Max Born, divergirá em pelo menos um aspecto fundamental da análise da causalidade proposta por Bohr e Heisenberg, apesar de ser grande defensor do princípio de complementaridade, proposto por Niels Bohr. Atento às reflexões de Reichenbach (1944), Born (1949) considerará a causalidade e o determinismo como dois conceitos distintos. Para Born (cf. 1949, p. 8), o determinismo postula que os eventos em tempos diferentes estão de tal modo conectados por uma lei, que permitem predições tanto no tempo futuro quanto no passado. A causalidade postula, no entanto, que uma situação física observável depende de outra e a lei causal estabelece a dependência entre elas. Desvencilhada do determinismo, a causalidade permanece válida na mecânica quântica, a pesar da relação de dependência ser do tipo probabilista. A noção de probabilidade é assim associada à de causalidade.

Vemos, portanto, como alguns defensores da chamada interpretação de Copenhague adotam soluções distintas para o problema da causalidade. Gostaria ainda, para finalizar, considerar as tentativas de recuperação do sentido transcendental de causalidade adotadas por dois neokantianos, a saber, Grete Hermann e Ernst Cassirer.

### 3 A CAUSALIDADE EM QUESTÃO PELOS NEOKANTIANOS

No capítulo intitulado “A mecânica quântica e a filosofia kantiana”, Heisenberg (1996 [1969]) relata suas discussões com Friedrich von Weizsäcker et Grete Hermann durante o ano de 1934 em Leipzig, sobre a atualidade da reflexão kantiana face a nova física. As discussões que ocorreram durante o seminário dirigido por Heisenberg foram motivadas, sobretudo, pela presença da jovem filósofa e matemática Grete Hermann, que veio de Göttingen, especialmente para encontrar na fonte a solução para a aparente contradição entre o caráter *a priori* e universal da lei causal e o fracasso dessa lei no domínio da teoria quântica. Hermann desconfia da posição majoritariamente adotada pelos físicos e filósofos da ciência de que o caráter sintético e *a priori* do princípio de causalidade havia sido refutado definitivamente pela mecânica quântica, o que fazia ruir por inteiro o edifício da teoria kantiana do conhecimento.

Em seu ensaio de 1935, Hermann considera que a fonte maior dos mal-entendidos, quando se interpreta os resultados da física atômica, reside na identificação equivocada entre a causalidade e o determinismo (cf. Hermann, 1996 [1935], p. 97-9). Simbolizado pela ideia do demônio de Laplace, o determinismo pressupõe que passado e futuro encontram-se absolutamente determinados, se conhecemos a lei física e as condições iniciais do sistema. O determinismo é, assim, a expressão do princípio de previsibilidade pelo cálculo, o qual foi, sem dúvida, rejeitado pela teoria quântica, que impôs limites intransponíveis a toda previsão determinista. No entanto, Hermann (p. 98) considera que o princípio de causalidade tem uma extensão muito maior do que a do determinismo, que não pode ser identificada à previsão do efeito a partir da causa. O princípio de causalidade afirma apenas a dependência causal entre dois eventos *A* e *B*, mas não que o evento *B* é predito quando *A* é conhecido. A possibilidade de prever o encadeamento de eventos é apenas um critério de aplicabilidade da lei causal, mas não a lei causal em si mesma. Se pudermos separar a lei causal de seu critério de aplicação, ela permanece perfeitamente válida para a mecânica quântica (Hermann, 1996 [1935], p. 98-9). Hermann procura, então, evidenciar como uma teoria de tipo indeterminista não exclui uma identificação *post factum* das causas de um resultado particular de medida. Ela propõe, para tanto, o conceito de “causalidade retroditiva”



para dar conta do contexto da teoria quântica. Assim podemos sem contradição assumir uma teoria preditivamente indeterminista e retroditivamente causal.

Ernst Cassirer (1956 [1937], p. 65), em seu livro dedicado ao problema da causalidade da física moderna, divide com Hermann a convicção de que a causalidade e o determinismo são dois princípios absolutamente distintos. Ele, no entanto, considera que mesmo no contexto da física clássica a identificação entre a causalidade e o determinismo não pode ser mantida. Para Cassirer (p. 61), foi Helmholtz quem apresentou a formulação mais adequada do princípio de causalidade, em um sentido fortemente distanciado da fórmula laplaciana. Influenciado pela obra de Kant, esse fisiologista alemão distingue as regras gerais descobertas pela ciência experimental, como é o caso das leis de refração ou da de Boyle, das leis da ciência teórica. A finalidade da investigação experimental e teórica é buscar, a princípio, causas variáveis para chegar, ao final, às causas invariáveis que explicam todo tipo de variação. Nesse último plano da pesquisa, encontra-se o princípio de causalidade, segundo o qual as mesmas circunstâncias produzem os mesmos efeitos (cf. Cassirer, 1956 [1937], p. 63). Em uma perspectiva kantiana, Helmholtz defende que a causalidade necessária não pertence à natureza, mas é uma condição de possibilidade de inteligibilidade da própria natureza (cf. Helmholtz, 1989 [1867], p. 591-2). E se, por acaso, defrontarmos com dificuldades na aplicação da lei causal, não significa ser ela falsa, mas que estamos diante da situação de não conhecermos ainda o conjunto de causas que agem no fenômeno em questão.

Para Cassirer (1956 [1937], p. 62-3), a lei causal, tal como definida por Helmholtz, é um princípio regulador do nosso pensamento e, como tal, em nada se assemelha à máxima pragmática, de inspiração laplaciana, segundo a qual “saber é prever”, adotada pelo positivismo contemporâneo. No entanto, a identidade entre causalidade/predição, que vai ser refutada pela teoria quântica, não se sustenta nem mesmo no domínio da física clássica, como Helmholtz bem evidenciou ao eliminar o critério de predição como determinante do conceito de causa. Assim, Cassirer concorda com Grete Hermann quando ela distingue a lei causal de seu critério de aplicação, no contexto da física quântica. O que, no entanto, Cassirer tenta mostrar é que essa distinção também se mantém no cenário da ciência clássica (p. 64-5).

Para defender a pertinência do princípio de causalidade no domínio da mecânica quântica, Cassirer lança mão da concepção proposta por Helmholtz desse princípio como uma máxima reguladora. Esse conceito transcendental de causa como procedimento de conformação da atividade da física às leis não foi negado, segundo ele (cf. 1956 [1937], p. 114, 123), por nenhum dos revolucionários da nova física. Essa mesma ideia podemos encontrar em Max Planck (1963 [1936]) que se apóia em Bohr para reconhecer que, na mecânica quântica, esse procedimento causal é indispensável para

todas as interpretações dos resultados de medida. Como vimos precedentemente, Bohr não nega a validade do princípio causal, o que não é mais possível é a identificação da descrição causal com a descrição espaço-temporal. De acordo com a interpretação de Copenhague essas duas descrições devem ser tomadas como complementares e não podem estar contidas em um único ponto de vista (cf. Bohr, 1983 [1928], p. 88).

Seguindo Bohr, Cassirer propõe definir o princípio transcendental da causalidade em um sentido complementar. A propósito da declaração categórica de Heisenberg em seu artigo de 1927, Cassirer está convencido que essa dura crítica atingiu apenas uma certa formulação estrita do princípio de causalidade. A interpretação que o próprio Heisenberg deu mais tarde dos princípios da teoria quântica mostra que a formulação mais universal desse princípio não foi tocada. A origem do equívoco da declaração de Heisenberg reside na definição que ele tomou como ponto de partida de seu argumento, a saber, “quando conhecemos o presente precisamente, podemos prever o futuro” (Heisenberg, 1983 [1927], p. 83). Como as relações de incerteza impedem o conhecimento exato do presente, Heisenberg conclui que a lei causal não seria mais válida no domínio quântico. O problema para Cassirer (1956 [1937], p. 128) é que Heisenberg se apóia sobre a formulação laplaciana que, como ele tentou mostrar, é limitada e inexata. Contudo, se tomamos a formulação que Helmholtz deu, como compreendendo a exigência de conformidade à lei, as relações de incerteza se conformam a esse princípio. A explicação do efeito Compton, exemplo típico de derivação das relações de incerteza, supõe a conexão do postulado quântico com os princípios de conservação de energia e quantidade de movimento, que são considerados as expressões mais puras do princípio de causalidade (cf. Cassirer, 1956 [1937], p. 124).

O ideal regulador de busca pelos invariantes não foi de forma alguma abandonado na nova física. Esse ideal da invariância de certas quantidades fundamentais é pressuposto em todas as descrições teóricas, como no sistema definido de constantes universais, tais como a velocidade da luz, a massa e carga do elétron, a massa do próton etc. Particularmente na teoria quântica, a validade da constante de Planck é pressuposta em toda consideração teórica e experimental.

## CONCLUSÃO

Para concluir, eu gostaria de levantar apenas dois aspectos que considero importantes, em meio a essa polifonia de posições a respeito da validade da causalidade no contexto da teoria quântica. Em primeiro lugar, o que opõe positivistas e neokantianos não é o caráter sintético *a priori* desse princípio e muito menos sua pertinência. Deixando à

parte a posição de Russell, que é o único a defender que o princípio de causalidade seja banido do campo da filosofia, tanto Schlick e Reichenbach, de um lado, quanto Hermann e Cassirer, por outro, reconhecem sua importância e pertinência. A diferença entre eles reside fundamentalmente no fato dos positivistas identificarem a causalidade e o determinismo, ao passo que os neokantianos são absolutamente críticos em relação a essa identidade. Uma vez reconhecida a identidade, os positivistas evidenciam a limitação da causalidade, lançando mão do conceito de probabilidade, como sendo mais universal que a clássica noção causal. Os neokantianos, por sua vez, ao negarem a identidade, partem para uma definição mais geral que possa englobar tanto o contexto clássico quanto o contexto quântico. Os físicos da escola de Copenhague, no entanto, adotam uma terceira via, cuja solução nos é oferecida pelo princípio de complementaridade.

O segundo aspecto muito interessante desse debate está na aproximação das posições dos dois principais oponentes – Schlick e Cassirer – na identificação da causalidade como uma máxima reguladora, posição também respaldada por Max Planck. Ao reconhecer que a causalidade não pode ser uma proposição empírica, nem um juízo *a priori* analítico, Schlick (1979 [1931], p. 193-7) apresenta a causalidade como uma espécie de princípio heurístico, de natureza eminentemente prática, que pode ser seguido ou não. O que é heurístico para Schlick, é princípio regulador para Cassirer, resultando ser no final uma diferença terminológica a oposição entre os dois rivais em sua análise sobre a natureza de tal princípio.☉

*Patrícia KAUARK LEITE*

Professora Doutora do Departamento de Filosofia,  
Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas,  
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

*pkauark@fafich.ufmg.br*

ABSTRACT

The development of quantum theory in the first half of the twentieth century sparked a heated debate among philosophers and physicists about the nature of physical laws, and in particular about the validity of the principle of causality. In view of Planck's theory of radiation, Max Born's probabilistic interpretation, Heisenberg's uncertainty relations and Bohr's complementarity principle, many physicists cast doubt on classical causality, whose legitimacy seemed initially to be no longer guaranteed in the quantum domain. The aim of this paper is to present and discuss the different positions in this debate. In addition to the arguments raised by the Copenhagen interpreters, we will analyze those supported by neo-Kantians and neo-positivists. In conclusion, we will show that despite their philosophical antagonisms, Schlick's position in this debate seems to be closer to his opponent Cassirer than to his collaborator Reichenbach.

KEYWORDS • Causality. Quantum mechanics. Neo-positivism. Neo-Kantianism. Copenhagen interpretation.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOHR, N. The causality problem in atomic physics. *New theories in physics. Conference organized in collaboration with the International Union of Physics and the Polish Intellectual Co-operation Committee.* Warsaw, May 30th - June 3rd. 1938.
- \_\_\_\_\_. On the notions of causality and complementarity. *Dialectica*, 2, 3, 4, p. 312-9, 1948.
- \_\_\_\_\_. Quantum physics and philosophy: causality and complementarity. In: KLIBANSKY, R. (Ed.). *Philosophy in the mid-century: a survey.* Firenze: La Nuova Italia Editrice, 1958. p. 308-14.
- \_\_\_\_\_. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. In: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement.* Princeton: Princeton University Press, 1983 [1928]. p. 87-126.
- BORN, M. Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37, p. 863-7, 1926a.
- \_\_\_\_\_. Quantenmechanik der Stossvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 38, 803-27, 1926b.
- \_\_\_\_\_. On the meaning of physical theories. *Naturwissenschaften*, 17, p. 109-18, 1929.
- \_\_\_\_\_. *Natural Philosophy of Cause and Chance.* Oxford University Press, 1949.
- CASSIRER, E. *Determinism and indeterminism in modern physics: historical and systematic studies of the problem of causality.* New Have: Yale University Press, 1956 [1937].
- FEIGL, H. & SELLARS, W. (Ed.). *Readings in philosophical analysis.* Atascadero: Ridgeview Publishing Company, 1949.
- HEISENBERG, W. *The physical principles of the quantum theory.* New York: Dover Publications, 1949 [1930].
- \_\_\_\_\_. The physical content of quantum kinematics and mechanics. In: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement.* Princeton: Princeton University Press, 1983 [1927]. p. 62-84.
- \_\_\_\_\_. *A parte e o todo.* Tradução V. Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996 [1969].
- HELMHOLTZ, H. *Optique physiologique,* Traduction E. Javal et N. Th. Klein. Sceaux: Jacques Gabay, 1989 [1867].
- HERMANN, G. *Les fondements philosophiques de la mécanique quantique.* Paris: Vrin, 1996 [1935].
- KLIBANSKY, R. (Ed.). *Philosophy in the mid-century: a survey.* Firenze: La Nuova Italia Editrice, 1958.

- MULDER, H. L. & VELDE-SCHLICK, B. (Ed.). *Philosophical papers of Moritz Schlick*. Dordrecht: Reidel, 1979 [1931]. v. 2 (1925-1936).
- PLANCK, M. 'Causality in Nature'. In *The Philosophy of Physics*. Translated by H. Johnston. New York: The Norton Library, 1963 [1936].
- REICHENBACH, H. *Philosophic foundations of quantum mechanics*. California: University of California Press. 1944.
- \_\_\_\_\_. *The direction of time*. Berkeley: University of California Press, 1956.
- \_\_\_\_\_. The causal structure of the world and the difference between past and future. In: REICHENBACH, M. & COHEN, R. S. (Ed.). *Selected writings of Hans Reichenbach: 1909-1953*. Dordrecht/Boston: Reidel, 1978 [1925]. v. 2, p. 81-119.
- \_\_\_\_\_. The problem of causality in physics. In: REICHENBACH, M. & COHEN, R. S. (Ed.). *Selected writings of Hans Reichenbach: 1909-1953*. Dordrecht/Boston: Reidel, 1978 [1931]. v. 1, p. 326-42.
- REICHENBACH, M. & COHEN, R. S. (Ed.). *Selected writings of Hans Reichenbach: 1909-1953*. Dordrecht/Boston: Reidel, 1978.
- RUSSELL, B. On the notion of cause. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 13, p. 1-26, 1913.
- SCHLICK, M. Causality in everyday life and in recent science. In: FEIGL, H. & SELLARS, W. (Ed.). *Readings in philosophical analysis*. Atascadero: Ridgeview, 1949 [1932]. p. 515-33).
- \_\_\_\_\_. SCHLICK, M. Causality in contemporary Physics. Translation P. Heath. In: MULDER, H. L. & VELDE-SCHLICK, B. (Ed.). *Philosophical papers of Moritz Schlick*. Dordrecht: Reidel, 1979 [1931]. v. 2 (1925-1936), p. 176-209.
- WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983 [1928].

