
Implicações filosóficas da microfísica¹

SILVIO SENO CHIBENI

Departamento de Filosofia - IFCH

Universidade Estadual de Campinas

Resumo: Este artigo apresenta uma visão geral da discussão atual em torno das implicações filosóficas da microfísica, em um nível acessível ao público não-especializado. Elucida-se o papel preciso do realismo científico nessa questão, apontando-se algumas confusões comuns a esse respeito. Indica-se que, dados certos resultados recentes nos fundamentos da física, a adoção daquela posição filosófica descortina desafiadores horizontes de investigação.

Abstract: *This paper presents an introductory, non-technical survey of the much-debated issue of the philosophical implications of microphysics. Some frequent misunderstandings about the precise role of scientific realism in this discussion are dispelled. It is pointed out that, given certain recent results in the foundations of physics, the adoption of this philosophical position opens up broad fields of investigation.*

1. Introdução

É bem sabido que mesmo após a ciência e a filosofia haverem assumido identidades mais ou menos distintas, a partir da era moderna, elas não cessaram de todo de se influenciar mutuamente. Um exemplo significativo é o papel desempenhado pela crença universal na dinâmica newtoniana no desenvolvimento da filosofia de Kant. Também é visível a influência da concepção mecanicista do mundo, inerente às teorias clássicas e relativistas, nas doutrinas de vários filósofos modernos e contemporâneos.

Parece haver acordo entre os filósofos que apreciaram de perto certos desenvolvimentos recentes na microfísica de que eles criaram uma situação sem precedentes na história das conexões entre a ciência e a filosofia. O caráter *sui generis*

¹ Texto apresentado no Encontro de Filosofia Analítica – Comemoração do Centenário de Nascimento de Rudolf Carnap, realizado em Valinhos, de 1 a 5 de setembro de 1991, organizado conjuntamente pelo Departamento de Pós-Graduação em Filosofia da PUCCAMP, Departamento de Filosofia da PUC-RJ e Departamento de Filosofia da UFRJ. Gostaria de agradecer aos organizadores desse evento pelo convite que me foi feito para realizar esta palestra, assim como ao Professor Michel Ghins, da Universidade Católica de Louvain, por haver lido a penúltima versão deste artigo e feito sugestões que contribuíram para aprimorar a sua apresentação.

dessa situação liga-se parcialmente ao fato de que *não* se trata de implicações filosóficas de *mais uma* teoria física. Infelizmente, os termos em que essa discussão comumente se trava – fala-se freqüentemente em “conseqüências filosóficas da *mecânica quântica*”, por exemplo – induzem a esse engano. Se tal fosse o caso, estaríamos diante de mais um episódio como tantos outros, e seu interesse estaria limitado pela necessária vulnerabilidade de qualquer teoria física.

Por mais difícil que seja crer nisto à primeira vista, é um fato inegável que investigações inusitadas forneceram evidência empírica quase direta contra certas concepções extremamente gerais e básicas acerca do mundo, que sempre fizeram parte das teorias físicas (com exceção da mecânica quântica) e do senso comum.

Embora alguns dos resultados principais surpreendentemente estejam ao alcance de um público culto não-especializado, naturalmente este não é o lugar para reproduzi-los, ainda que em suas linhas gerais. Este assunto apresenta desdobramentos extremamente variados e complexos, que ocupam a maior parte da literatura em filosofia e fundamentos da física das três últimas décadas, e sua exploração parece estar ainda em sua fase inicial. Tentarei aqui oferecer uma idéia geral, necessariamente incompleta e simplificada, dessa discussão.

2. Primórdios da discussão contemporânea

Os problemas começaram com o advento da mecânica quântica, nossa teoria fundamental da estrutura da matéria. Apesar de sua enorme abrangência e precisão empírica, essa teoria representa, por suas características conceituais e estruturais, um sério desafio à intuição física ordinária. Os conceitos clássicos fundamentais sobre a natureza da matéria e do espaço-tempo nela não encontram aplicação imediata e irrestrita, o que tem obstado à elaboração de uma ontologia compatível com as relações inter-fenomênicas previstas pela teoria e admiravelmente corroboradas pela experiência. Em conseqüência, essa teoria *prima facie* não se amolda a uma interpretação realista, o que aparentemente a singulariza entre todas as demais teorias físicas de todos os tempos.

Esse fato, que se tornou evidente desde a criação da teoria, na segunda metade da década de 20, acarretou aquilo que Popper denominaria de um “cisma na física”, em um dos volumes do Posfácio de seu *The Logic of Scientific Discovery* especificamente destinado a tratar da questão da mecânica quântica (Popper 1982). Entre os próprios pais da teoria estabeleceu-se a divisão entre aqueles que acreditavam que a referida característica da mecânica quântica indica que ela não pode constituir uma descrição completa da realidade (Einstein, Schrödinger, o jovem e o velho de Broglie), e os que mantinham que aquela característica indica, ao contrário, a necessidade de revisões profundas em várias de nossas mais fundamentais concepções físicas e filosóficas (Bohr, Heisenberg, Dirac, Born, Pauli, Jordan).

Um acalorado e duradouro debate estabeleceu-se. Argumentos diversos para as mais variadas teses foram apresentados por seus principais protagonistas, destacando-se, por sua ampla repercussão, os argumentos de Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) e o do “gato” de Schrödinger, ambos apresentados em 1935.² A cogência desses argumentos forçou os adversários a buscarem refúgio em inesperadas e, não raro, bizarras posições físicas e filosóficas. Livros-texto, artigos e conferências sobre a teoria quântica via de regra abrem espaço para discussões ditas “epistemológicas”. Apesar da obscuridade, e mesmo da precariedade, da maior parte dessas discussões pretensamente filosóficas, a opinião professada da grande maioria dos físicos rapidamente deslocou-se para alguma forma de oposição ao pensamento clássico, que, remando contra a maré, Einstein defendeu até o fim de sua vida.

Costuma-se dizer que a comunidade dos físicos se aglutinou em torno da chamada “Interpretação Ortodoxa”, ou “de Copenhague”, da mecânica quântica, desenvolvida sob a liderança de Bohr. Esta afirmação é, porém, enganosa, em um certo sentido, dado que uma análise cuidadosa revela uma grande heterogeneidade de vistas entre os supostos proponentes dessa interpretação. E mais: as concepções do próprio Bohr estão longe de constituir um conjunto homogêneo ou mesmo consistente de teses (pelo menos até onde seus escritos podem ser compreendidos). No entanto, um ponto comum parece existir: a sedução, pelo menos em alguns momentos, por alguma forma de anti-realismo.

Simpatizo com a tese de que tais concessões anti-realistas raramente são efetivamente levadas em conta quando os cientistas estão fazendo *hard work*. Todavia, acredito que a predominância dessas opiniões nas discussões de fundamentos teve um efeito inibidor importante sobre as pesquisas em física.

Embora aparentemente o movimento positivista lógico, que vivia seu apogeu quando a mecânica quântica se desenvolveu, tenha exercido alguma influência no estabelecimento da posição “ortodoxa”, as formas de anti-realismo que nela compõem não se identificam com o reduativismo positivista estrito. Encontramos, sim, elementos tipicamente *instrumentalistas*, como bem ilustra esta frase de Bohr em seu artigo no volume editado por Schilpp em homenagem a Einstein (Bohr 1949, p. 238):

... a interpretação física apropriada do formalismo simbólico da mecânica quântica resume-se [*amounts to*] apenas em predições, de caráter determinado ou estatístico, relativas a fenômenos indivisíveis que aparecem sob condições definidas por conceitos da física clássica.

Também encontramos declarações que pendem para formas de anti-realismo mais radicais, de tipo idealista. Vejamos alguns exemplos importantes. Ficou famoso este trecho da réplica de Bohr a Einstein, Podolsky e Rosen (Bohr 1935, pp. 696-7):

A aparente contradição [apontada por EPR] na verdade revela apenas uma inadequação essencial do ponto de vista usual da filosofia natural para um tratamento racional dos

² Einstein, Podolsky & Rosen 1935; Schrödinger 1980.

fenômenos físicos do tipo dos que nos ocupamos na mecânica quântica. De fato, a *interação finita entre objeto e agentes de mensuração*, condicionada pela própria existência do quantum de ação, acarreta ... a necessidade de uma renúncia final do ideal clássico de causalidade e uma revisão radical de nossa atitude com relação ao problema da realidade física.

Em 1949, comentando esse seu artigo, Bohr esclarece um pouco mais o sentido em que fala em “revisão radical de nossa atitude com relação ao problema da realidade” (Bohr 1949, p. 234):

Lendo essas passagens, estou plenamente consciente da ineficiência de expressão que há de ter tornado muito difícil apreciar o fluxo da argumentação que visa a apontar a ambigüidade essencial envolvida ao se fazer referência a atributos físicos de objetos quando se lida com fenômenos onde nenhuma distinção nítida pode ser feita entre o comportamento dos próprios objetos e suas interações com os instrumentos de observação.

Já em um artigo de 1933 encontramos a seguinte afirmação de Bohr, que indica, de maneira inequívoca, um certo compromisso com uma forma de subjetivismo idealista (Bohr 1933, p. 423):

Do mesmo modo que o conceito de relatividade geral expressa a dependência essencial dos fenômenos físicos com relação ao sistema de referência usado para sua co-ordenação no espaço e no tempo, assim também a noção de complementaridade serve para simbolizar a limitação fundamental, encontrada na física atômica, de nossa idéia enraizada dos fenômenos como existindo independentemente dos meios pelos quais são observados.

De teor semelhante são algumas das declarações de Heisenberg. Em seu livro *The Physical Principles of Quantum Theory* (1949), ele sustenta (p. 2) que as dificuldades da teoria quântica prendem-se exatamente ao fato de não obedecer à exigência tradicional da ciência de divisão do mundo em sujeito e objeto (observador e observado). Lembrando que a teoria da relatividade levou a uma revisão de nossas concepções de espaço e de tempo, Heisenberg afirma, mais abaixo (p. 65):

Do mesmo modo, é agora útil revisar as discussões fundamentais, tão importantes para a epistemologia, da dificuldade de separar-se os aspectos subjetivos e objetivos do mundo. Muitas das abstrações que são características da moderna física teórica podem ser encontradas nas discussões filosóficas dos séculos passados. Naquela época, essas abstrações podiam ser ignoradas como meros exercícios mentais pelos cientistas cuja única preocupação era a realidade; hoje, porém, somos forçados a considerá-las seriamente pelos refinamentos da arte experimental.

E Putnam, em um artigo de sua fase pós-realista, propõe que as dificuldades dos fundamentos da mecânica quântica sejam resolvidas pela adoção de uma lógica quântica juntamente com sua forma de anti-realismo (*internal realism*), que acarreta a relativização da realidade:

Relativamente a *este* observador, *estas* propriedades são `reais`; ... mas relativamente a um outro observador outras propriedades seriam `reais`. ...

[Rejeito] a idéia de Einstein de um “detached observer”. Há entidades reais, *mas quais são elas é relativo ao observador*. (Putnam 1983, pp. 262 e 269.)

As características da mecânica quântica que deram margem a tais posições anti-realistas também têm sido apontadas como relevantes para uma vasta série de problemas filosóficos ou de fundamentos da ciência, quais sejam: determinismo e causalidade, livre-arbítrio e ética, problema mente-corpo, consciência, holismo, relações não-supervenientes, individuação de objetos, explicação científica, lógica quântica, vida, espaço-tempo, etc.

Antes de fornecer um breve sumário da história dos resultados recentes que em um sentido importante mostraram que qualquer teoria empiricamente adequada deve necessariamente incorporar parte dos elementos da mecânica quântica que levaram a essas alegações, vejamos algo sobre a situação da própria mecânica quântica.

3. A situação na mecânica quântica

Como está implícito no que já disse, no cerne das discussões sobre os fundamentos da mecânica quântica está o problema de sua aparente incompletude. É importante enfatizar que, pelo menos a partir de 1930, nunca esteve em questão a correção empírica da teoria, ou seja, ninguém forneceu argumentos para mostrar que a teoria era empiricamente falsa.³

A descrição clássica do estado de um sistema físico, através da especificação da posição e do momentum (massa vezes velocidade) das partículas e dos valores dos campos em cada ponto do espaço é substituída, na mecânica quântica, por objetos matemáticos abstratos, denominados *funções de onda*, usualmente simbolizadas pela letra grega Ψ . É importante notar, porém, que não se trata em nenhum sentido de ondas identificáveis com as ondas usuais da física clássica; os domínios das funções de onda quânticas são espaços matemáticos multidimensionais e seus valores são números complexos; elas não podem ser entendidas como referentes a configurações de grandezas físicas no espaço físico tridimensional ordinário.

Contrariamente ao que ocorre com as teorias clássicas, onde a especificação do estado de um sistema permite o cálculo dos valores de *todas* as grandezas dinâmicas do sistema (energia cinética, momento angular, etc.), a especificação completa de um estado quântico (Ψ) só permite a previsão dos valores de *parte* dessas grandezas; para as demais, a teoria fornece apenas a probabilidade de sua ocorrência, em medidas efetuadas sobre o sistema. Um outro estado quântico (Ψ') poderá fornecer valores precisos para as grandezas que o primeiro não determinava, mas necessariamente deixará, por sua vez, de fornecer valores precisos para as grandezas que aquele determinava. E a teoria não permite a “junção” desses dois estados, a fim de que se obtenha a especificação completa de todas as propriedades físicas classicamente consideradas como pertinentes ao sistema.

Quando uma determinada grandeza não tem seu valor definido pelo estado quântico do sistema, uma medida dessa grandeza fornece um resultado aleatório. É *neste* sentido que

³ Isso até o surgimento da Desigualdade de Bell, em 1964; veremos abaixo que esse resultado levantou a suspeita teórica de que algumas das previsões empíricas da mecânica quântica poderiam ser incorretas.

se diz que a mecânica quântica é uma teoria *indeterminista*, já que os resultados das observações futuras sobre o sistema nunca são todos determinados, mesmo quando presentemente conhecemos perfeitamente o estado quântico do sistema.⁴

Esse aspecto da mecânica quântica foi visto por vários físicos como indicação de que a descrição quântica da realidade é incompleta, pois aparentemente ela deixa de especificar resultados de observação genuínos. Anteriormente a 1935, Einstein apresentou vários argumentos nesse sentido, que foram rebatidos através do apelo à controversa idéia de que o ato de observação inevitavelmente perturba o sistema observado.⁵

Foi para neutralizar essa saída que o argumento de EPR foi concebido. Esse argumento explora as previsões quânticas para certos sistemas físicos compostos de duas “coisas” quânticas (como está implícito no que foi dito mais acima, não há uma ontologia quântica, de modo que é melhor falar aqui simplesmente em “coisas”), tais como fótons, nêutrons, etc., que durante um certo tempo interagem e depois se separam (pelo menos aparentemente), indo cada uma para um lado. Naturalmente não me será possível reproduzir aqui o argumento de EPR em todos os seus detalhes, motivações e conseqüências. Apresentarei, no entanto, uma versão simplificada, mas que contribui para colocar em evidência os aspectos conceituais mais relevantes. A figura abaixo esquematiza o arranjo experimental usado no argumento.

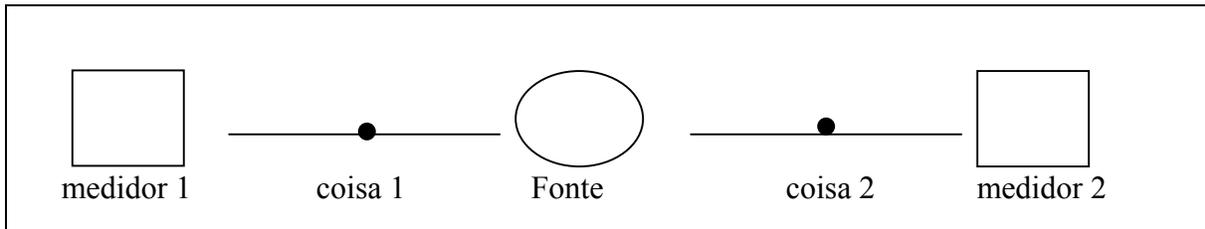


Figura 1. O arranjo experimental de EPR.

Uma fonte produz os pares de coisas quânticas já referidos. Em cada um dos lados da aparelhagem existe um medidor, que mede uma propriedade quântica simples (mas que realmente existe), a que denominarei “*S*”. Essa propriedade só tem dois valores, +1 e -1. A mecânica quântica prevê, e a experiência confirma, que sempre que o medidor 1 acusa um determinado valor, o medidor 2 acusa o valor oposto. A teoria não prevê o resultado de

⁴ Deve-se notar aqui que a evolução do estado do sistema regida pela equação fundamental da teoria, a equação de Schrödinger, é completamente determinista. O que acaba de ser dito implica que essa equação aparentemente não se aplica durante os processos de medida. Esse fato constitui a fonte de grandes embaraços na interpretação da teoria.

⁵ Não reproduzirei aqui as objeções que mais recentemente foram levantadas contra essa contra-argumentação, por falta de espaço e por haver tratado do assunto em outros trabalhos (Chibeni 1984 e 1991). Para uma crítica da doutrina da perturbação, ver Brown e Redhead 1981. Para uma análise histórica dos argumentos de Einstein, ver Brown 1981.

uma medida de S , mas se for dado que o valor encontrado em uma medida efetuada em um lado é $+1$, digamos, ela assegura que o valor encontrado em uma medida no outro lado será -1 , e vice versa. Há, pois, uma correlação absoluta entre os resultados dos dois aparelhos de medida.

Classicamente, esse tipo de correlação seria explicado trivialmente, assumindo-se que a correlação entre os resultados de medida nos dois medidores deve-se a correlações entre propriedades dos objetos que estão sendo medidos, e que tais correlações são estabelecidas quando da criação conjunta dos objetos na fonte.

É útil ilustrar essa explicação clássica através de um exemplo ordinário. Uma fábrica de luvas sempre produz luvas em pares. Imaginemos que o dono da fábrica, por alguma estranha psicose (desenvolvida talvez em suas tentativas de solucionar os enigmas da microfísica...), determine que assim que um par seja produzido na seção de costura, cada uma das luvas, direita (D) e esquerda (E), seja colocada ao acaso (por um operário cego, por exemplo) em duas caixas, marcadas com um mesmo número, o número do par. Essas caixas são então fechadas, para que as luvas não sejam vistas, e colocadas sobre esteiras, que as transportam em direções opostas, levando-as para dentro de quartos fechados. Em cada um desses quartos está um operário, cuja função consiste em abrir as caixas que chegam, e observar se a luva é esquerda ou direita, registrando os resultados em uma tabela, ao lado do número da caixa (e portanto do par a que a luva pertence). A Figura 2 mostra um esquema dessa bizarra fábrica de luvas.

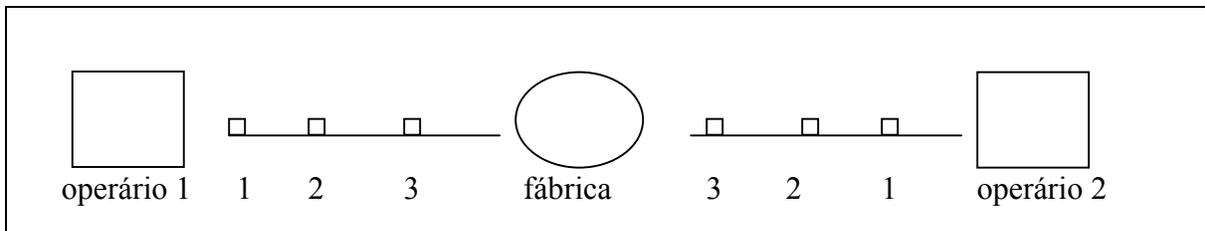


Figura 2. Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas.

Dado esse sistema de produção, é claro que as observações dos operários 1 e 2 estarão correlacionadas, de maneira análoga em que o estão os registros dos medidores no experimento de EPR. Sempre que um operário observar o “valor” E, o outro observará o “valor” D, e vice versa. A Figura 3 mostra possíveis resultados de observações dos físicos quânticos e dos operários da fábrica de luvas.

Número do par	S_1	S_2
1	+1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	-1
5	-1	+1
6	-1	+1

Número do par	Luva 1	Luva 2
1	D	E
2	E	D
3	E	D
4	D	E
5	E	D
6	D	E

Figura 3. Exemplos de tabelas de correlação: Experimento de EPR e fábrica de luvas.

Estamos diante de *fenômenos* de correlação formalmente idênticos, e nada é mais natural do que supor que os *mecanismos* que os produzem também são idênticos, ou seja, que a correlação das medidas de S no experimento de EPR se deve à existência de *propriedades intrínsecas* a cada coisa quântica (cada uma traria em si um valor de S durante todo o tempo), e que a correlação entre essas propriedades se estabeleceu desde que o par foi criado. É essencialmente esse o raciocínio de Einstein, Podolsky e Rosen.

Por incrível que possa parecer, porém, a mecânica quântica *rejeita* essa explicação óbvia, que funciona perfeitamente bem no caso das luvas e das propriedades clássicas em geral. *Na verdade, a mecânica quântica não somente rejeita a explicação clássica das correlações de EPR como também não a substitui por nenhuma outra!* Vejamos como isso ocorre.

Segundo a mecânica quântica, quando os pares de coisas quânticas se separam, cada uma delas simplesmente não tem valor definido da propriedade S . Tudo o que a teoria diz é que há 50% de probabilidade que uma medida de S sobre a coisa dê +1, e 50% que dê -1. É durante a medida que o valor de S se torna definido, sendo em um certo sentido *criado* pela medida. (Note-se que tal processo guarda pouca relação com o conceito usual de 'medida'.) Mas qual será o valor específico "criado" em uma determinada medida é, segundo a teoria, uma questão de puro acaso. Desse modo, fica claro que a teoria torna *impossível* a explicação do fenômeno em termos de propriedades inerentes a cada uma das coisas, e cujos valores tenham sido definidos na fonte.

É então inevitável uma pergunta crucial: *Se as coisas não tinham propriedade S alguma antes de serem sujeitas a mensurações dessa propriedade, por que fantástica coincidência sempre que a interação da coisa 1 com o aparelho 1 cria um determinado valor a interação da coisa 2 com o aparelho 2 cria o valor oposto, sendo que esses dois aparelhos podem estar situados a uma distância arbitrariamente grande um do outro (em galáxias diferentes, por exemplo)?* A única maneira de se evitar a atribuição desse fenômeno a uma coincidência de vastas proporções, é assumir que algum tipo de interação não-local desconhecida e estranha conecta os dois sub-sistemas de modo a que a criação (aleatória) de um determinado resultado em um deles cause a produção do resultado oposto

no outro. A situação é agravada pelo fato de a teoria estabelecer que tão logo uma medida seja efetuada sobre uma das coisas, com a obtenção de um dado valor, *imediatamente* o resultado de uma medida de S sobre a outra coisa se tornará definido, quando antes não era! Mas interações desse tipo parecem conflitar com determinadas consequências da teoria da relatividade especial, que está amplamente apoiada nos fatos.

Einstein, que descobriu esse desconcertante paradoxo, não podendo aceitar nem que as correlações se devam a uma coincidência nem que eram produzidas por uma ação não-local instantânea, viu-se forçado a atribuí-las à *incompletude* da teoria. De fato, se à descrição quântica do estado das coisas 1 e 2 forem acrescentados parâmetros contendo informações adicionais, essa especificação mais completa poderá evitar a indefinição dos valores da propriedade S antes da medida, possibilitando assim a explicação das correlações nos termos ordinários, e sem qualquer apelo a ações não-locais.

4. Além da mecânica quântica

Conforme já notei, o argumento de EPR esteve no centro de vivas discussões sobre os fundamentos da mecânica quântica desde que foi proposto em 1935. Relatarei agora de modo muito sucinto e simplificado os principais desdobramentos a que deu lugar.

Em 1932, John von Neumann publicou uma obra que se tornaria um clássico (von Neumann 1955), na qual forneceu um tratamento matemático rigoroso da estrutura da nova teoria. Nesse livro, ele apresentou uma prova da impossibilidade da complementação da mecânica quântica através de parâmetros adicionais – que ficaram conhecidos na literatura como *parâmetros* ou *variáveis ocultas* (devido ao fato de tais parâmetros não comparecerem na descrição quântica). Essa prova dissuadiu a grande maioria dos físicos da busca de teorias mais completas que a mecânica quântica, denominadas genericamente de *teorias de variáveis ocultas*. Apenas Einstein e uns poucos seguidores não a levaram a sério, por motivos não completamente explicitados. Foi somente bem mais tarde que começou a ficar claro que esses poucos dissidentes poderiam estar certos: não obstante sua validade matemática, a prova contém premissas fisicamente vulneráveis.

Em 1952, um recém convertido à posição dissidente, o físico americano David Bohm (que na época se encontrava exilado em São Paulo) publicou dois artigos (Bohm 1952, I e II) nos quais apresentou uma teoria de variáveis ocultas aparentemente consistente e que é capaz de reproduzir as previsões empíricas da mecânica quântica. À época, essa teoria foi vista com desconfiança, pois a prova de von Neumann dizia que teorias desse tipo eram impossíveis.

Para complicar as coisas, Andrew Gleason deu a público em 1957 outra prova da impossibilidade de teorias de variáveis ocultas (Gleason 1957). Outras provas foram posteriormente obtidas, as principais sendo a de Bell (1966) e a de Kochen e Specker (1967). Essas provas são de natureza puramente matemática. Em uma versão geral, mostra-se que se as grandezas físicas forem representadas, como na mecânica quântica, por

operadores auto-adjuntos no espaço de Hilbert, e se as relações algébricas entre os valores que a teoria de variáveis ocultas atribui a essas grandezas forem as mesmas relações que vigem entre os operadores correspondentes, então a teoria será inconsistente. O artigo de Kochen e Specker traz também um resultado mais simples, e portanto mais forte, para o caso de spin de sistemas de spin-1; neste caso, prescinde-se da assunção da representabilidade das grandezas por operadores no espaço de Hilbert. Tais provas podem ser consideradas versões melhoradas da prova de von Neumann. Como então entender o fato de Bohm haver apresentado uma teoria de variáveis ocultas em carne e osso ?

Uma primeira resposta pode ser encontrada nos próprios artigos pioneiros de Bohm. Estabeleceu-se porém na literatura a opinião de que o esclarecimento dessa questão foi feito por John Stewart Bell.¹ No mesmo artigo que contém o resultado de bloqueio acima mencionado (Bell 1966), Bell observa, em um desenvolvimento das linhas apontadas por Bohm, que a teoria de variáveis ocultas de Bohm apresenta um estranho aspecto, posteriormente denominado *contextualismo* na literatura especializada. Em termos não técnicos e simplificados, isso significa que em tal teoria os resultados de medida podem depender não apenas de propriedades inerentes ao sistema medido, mas também do “contexto” de medida, ou seja, da disposição do arranjo experimental de preparação de estado e de medida. É justamente por ser “contextual” que a teoria de Bohm escapa às referidas provas de impossibilidade.

Ora, essa característica da teoria de variáveis ocultas de Bohm redundava em um distanciamento do ideal clássico que se perseguia ao se procurar uma teoria de variáveis ocultas. E as referidas provas de Gleason, Bell e Kochen e Specker mostram que ela é inevitável em qualquer teoria de variáveis ocultas consistente que reproduza as previsões empíricas quânticas.

No caso específico dos sistemas EPR, o contextualismo implica um tipo de ação à distância, ou de *não-localidade*, pois o resultado de uma medida em um dos sub-sistemas pode depender da disposição da aparelhagem referente ao outro sub-sistema, espacialmente distante. Intrigado com esse aspecto da teoria de Bohm, Bell prosseguiu suas investigações, e ainda no mesmo ano, ou seja, em 1964, obteve outro resultado de importância capital.

Em um trabalho brilhante, por seu caráter inusitado, sua simplicidade e suas amplas conseqüências (Bell 1964), Bell deduziu, a partir de pressupostos mínimos – a atribuição completa de valores às grandezas físicas de um sistema e a impossibilidade da alteração instantânea desses valores por ações remotas –, uma previsão, na forma de um limite superior para o valor de uma expressão que mede o grau de correlação entre sistemas físicos do tipo EPR, ligeiramente modificados, onde a correlação deixa de ser absoluta. Esse resultado, a agora famosa *Desigualdade de Bell*, foi generalizado por Bell (1971) e Clauser e Horne (1974), para prescindir da assunção determinista da determinação precisa dos valores das grandezas físicas; *tudo* o que se exige é que as probabilidades que a teoria

¹ Curiosa e injustamente, esse ponto não tem sido observado na literatura. Em minha tese de doutorado (em elaboração) argumento em detalhe que a resposta de Bohm é em um certo sentido mais adequada do que a que prevalece na literatura.

assinala para os resultados de medida em um dos sub-sistemas independa da disposição do aparelho distante e do resultado que registre, quando o estado completo do sistema é dado.

Surpreendentemente, essa assunção mínima já é suficiente para produzir um conflito com a mecânica quântica: essa teoria *viola* as desigualdades de Bell. *É crucial aqui o fato de que os coeficientes de correlação que comparecem nessas desigualdades são grandezas empíricas básicas, que independem de qualquer hipótese teórica.*

Em 1972, Freedman e Clauser realizaram em Berkeley o primeiro teste experimental de uma versão da desigualdade de Bell obtida por Clauser *et alii* em 1969.² Os resultados confirmaram as previsões quânticas, desconfirmando portanto a assunção mínima mencionada acima. O experimento foi, desde então, repetido mais de uma dúzia de vezes, por diferentes experimentalistas e usando vários tipos de sistemas físicos e diferentes aparelhagens. Há consenso hoje de que o resultado global dessa série de experimentos foi a confirmação esmagadora das previsões quânticas, em prejuízo daquela assunção mínima.³

Dentre todos os testes das desigualdades de Bell, o realizado em 1982 por Alain Aspect e seus colaboradores na Universidade de Paris (Aspect *et al.* 1982) merece destaque especial, não somente pelo grande cuidado com que foi conduzido e pela admirável concordância quantitativa dos resultados com as previsões quânticas, mas principalmente por haver praticamente eliminado as teorias que contemplem ações não-locais a velocidades inferiores à da luz. A relevância física disso reside no fato de que a velocidade da luz é tida como uma velocidade-limite para as influências físicas. Todos os objetos e forças físicas conhecidos propagam-se a velocidades menores ou iguais à da luz. Além disso, a teoria da relatividade proíbe que um corpo qualquer seja acelerado até que sua velocidade ultrapasse a da luz, e prevê estranhas conseqüências para corpos que eventualmente já tenham velocidades superluminares (os hipotéticos táquions), como por exemplo a reversão na direção do tempo. Por todos esses motivos, a não-localidade a velocidades superluminares é algo extremamente repugnante aos físicos.

As relações entre localidade e a premissa essencial das desigualdades de Bell só começaram a ser aclaradas de modo satisfatório com o trabalho de Jon Jarrett (1984). Quando acima expus aquela premissa fiz uso implícito da análise de Jarrett. Em termos mais explícitos, o que Jarrett mostrou foi que na obtenção das desigualdades de Bell do tipo mais geral há duas assunções essenciais envolvidas, a que Shimony apropriadamente denominou *parameter independence* (PI) e *outcome independence* (OI) (Shimony 1986 e 1989). A primeira diz que, dada a especificação do estado completo do sistema, as probabilidades dos resultados de medida em um dos sub-sistemas independem da disposição do aparelho de medida do outro subsistema, em particular da grandeza física que nele está sendo medida. A segunda condição diz que, dada a especificação do estado completo do sistema, as probabilidades dos resultados de medida em um dos sub-sistemas independem do resultado de eventual medida de uma grandeza física sobre o outro subsistema.

² Freedman & Clauser 1972; Clauser *et al.* 1969.

³ Para resenhas dos experimentos, ver e.g. Chibeni 1984, Clauser & Shimony 1978 e Redhead 1987.

Jarrett mostrou que uma teoria que viole PI acarreta a possibilidade de transmissão de sinais, inclusive a velocidades superluminares, o que parece estar em conflito com a teoria da relatividade especial. Já uma teoria que viole apenas OI não implica necessariamente a possibilidade de transmissão de sinais, como ilustra o caso da própria mecânica quântica: essa teoria não está sujeita às desigualdades de Bell exatamente por violar OI; mas há vários resultados (Tausk 1967, Eberhard 1978, Ghirardi, Rimini e Weber 1980) que mostram que no caso da mecânica quântica a violação de OI não permite a transmissão de sinais.

É importante enfatizar que tanto em um caso como em outro há algum tipo de influência não-local. No primeiro, a não-localidade é em princípio controlável pelo experimentalista; no segundo, pode não o ser.

Tentarei agora uma apreciação geral simplificada da presente situação, considerando separadamente os casos das teorias deterministas e das teorias não-deterministas.

TEORIAS DETERMINISTAS: As teorias clássicas, i.e., deterministas não-contextuais, são eliminadas tanto pelos resultados algébricos de Gleason, Bell e Kochen e Specker como pela violação empírica das desigualdades de Bell.⁴ Portanto qualquer teoria determinista terá de ser contextual;⁵ no caso dos sistemas EPR isto significa não-localidade controlável (violação de PI). É o caso, por exemplo, da teoria de variáveis ocultas de Bohm.

TEORIAS NÃO-DETERMINISTAS (*ESTOCÁSTICAS*): As teorias estocásticas escapam dos resultados algébricos, mas esbarram nas desigualdades generalizadas de Bell. Tais teorias deverão necessariamente violar ou OI, ou PI, ou ambas essas condições. Não há exemplos concretos de teorias estocásticas que violem PI, ou ambas PI e OI, talvez por estas serem possibilidades aparentemente sem interesse; mas sabemos que teorias desses tipos estarão em aparente conflito com a teoria da relatividade especial, ou pelo menos com seu “espírito”. Teorias que violem apenas OI podem escapar a essa consequência, como é o caso da mecânica quântica. Também não há exemplos de teorias que violem OI e sejam “menos estocásticas” do que a mecânica quântica; é uma questão em aberto se tais teorias possibilitariam a transmissão de sinais; aparentemente sim; de qualquer modo, também não seriam interessantes.

Ficamos assim entre a mecânica quântica e as teorias de variáveis ocultas do tipo da de Bohm. Contra estas últimas pesa não somente o grave problema da localidade

⁴ Em meu ensaio manuscrito, “The EPR-type incompleteness arguments, the Bell inequalities and related topics”, mostro que uma teoria determinista que obedeça à chamada Regra do Produto satisfaz OI; sendo a teoria não-contextual, será também local, satisfazendo PI; isso implica que as teorias deterministas não-contextuais interessantes são eliminadas também pelos resultados relativos às desigualdades de Bell.

⁵ Isso se a teoria tiver que obedecer à muito plausível Regra do Produto. Analiso o papel que essa e outras regras semelhantes desempenham nas várias provas de bloqueio das teorias de variáveis ocultas em minha tese de doutorado, que também examina em detalhe as relações entre o contextualismo e a não-localidade.

controlável, mas também a navalha de Occam. Não há qualquer razão para crer que os parâmetros ocultos de tais teorias virão a ser controlados experimentalmente; ou, em outros termos, para crer que surgirão motivos *empíricos* para preferirmos tais teorias à mecânica quântica. Eis porque o interesse nessas teorias raramente saiu do círculo dos pesquisadores de fundamentos e filosofia da física.

Passo agora a considerações mais gerais. O fato inegável mais importante é a violação empírica das desigualdades de Bell, pois isso mostra que *há fenômenos que não podem ser explicados por nenhuma teoria em que as propriedades dos objetos físicos são locais*. Qualquer que seja a forma dessa não-localidade, estamos diante da necessidade de rever elementos centrais de nossas concepções de mundo clássica e relativista.

A via de Bohm e colaboradores permite manter o determinismo e a objetividade dessas concepções: os resultados de observações são determinados e entendidos como mera reavaliação de propriedades pré-existentes. O preço físico e filosófico a ser pago, no entanto, parece ser proibitivo.

A via da mecânica quântica é a um tempo mais desafiadora e mais fértil dos pontos de vista físico e filosófico, abrindo vastos horizontes de investigação. Antes de referir-me a esses horizontes, acho importante ressaltar que, nessa discussão, a questão do realismo é básica. As dificuldades de se conceber uma realidade compatível com uma interpretação realista da mecânica quântica levaram os físicos a propor interpretações instrumentalistas e idealistas, em uma escala sem precedentes na história da ciência. Os resultados recentes referidos acima mostraram que parte dessas dificuldades resultam diretamente da experiência e de restrições lógicas e matemáticas, independentemente da mecânica quântica ou de qualquer outra teoria física.

As saídas anti-realistas continuam e continuarão sendo uma alternativa. Discordo, porém, da opinião daqueles que sustentam que somos *obrigados* a seguir esse caminho.⁶

⁶ Vejamos alguns exemplos. Um influente artigo de divulgação, de Bernard d'Espagnat, "The quantum theory and reality" (d'Espagnat 1979), traz o seguinte sub-título: "*The doctrine that the world is made up of objects whose existence is independent of human consciousness turns out to be in conflict with quantum mechanics and with facts established by experiment*". É justo alertar, porém, que no corpo do artigo o autor é mais comedido, e coloca a refutação do realismo como *uma das* possíveis conseqüências da violação experimental das desigualdades de Bell. Asher Peres conclui um artigo com a frase: "Any attempt to inject realism in physical theory is bound to lead to inconsistencies" (Peres 1985, p. 205). Outro artigo relativamente comentado, "Quantum realism: Naïveté is no excuse", de Richard Healey, tem o propósito declarado de mostrar que os resultados recentes na microfísica representam "the strongest currently available objections to a particularly simple and inviting form of quantum mechanical realism" (Healey 1979, p. 121). Mais significativas são as alusões de van Fraassen a esta questão. Em seu *The Scientific Image* um dos argumentos contra a exigência ilimitada de explicação – uma peça importante na argumentação anti-realista do livro – é o de que ela levaria à exigência de teorias de variáveis ocultas na mecânica quântica (van Fraassen 1980, cap. 2, parágrafos 4, 5 e 6). Na introdução do artigo "The charybdis of realism: Epistemological implications of Bell's inequality" van Fraassen declara: "Concerning epistemic realism I shall argue that, given one plausible way to make it precise, it is refuted by Bell's inequality argument" (van Fraassen 1989, p. 97). Aqui também é preciso ressaltar que a noção de 'realismo epistêmico' a que van Fraassen se refere é bastante restrita: "Reasonable expectation of future events is possible only on the basis of some understanding of (or, reasonable certainty about) causal mechanisms that produce those events" (p. 98).

Estou convencido, *por razões filosóficas*, da conveniência de se adotar a posição do realismo científico.⁷ Mesmo neste caso, acredito que os resultados recentes na microfísica continuam tendo implicações filosóficas muito expressivas. Uma alteração radical de nossas crenças acerca de como é o mundo não pode deixar de repercutir sobre vários problemas de natureza filosófica.

Pelos motivos apontados, defendo que devemos tentar seriamente elaborar uma interpretação realista da mecânica quântica ao invés de seguirmos Bohm, mesmo estando conscientes das dificuldades a enfrentar.

Uma primeira série de conseqüências decorreria da presença de processos indeterministas no mundo. Isto remove a barreira colocada pelas teorias físicas clássicas no caminho das concepções de homem que o entendem como um ser dotado de livre-arbítrio, e portanto responsável por suas ações.⁸

Teríamos que admitir a categoria de *ser em potência* (porém possivelmente diferente da de Aristóteles).

Teríamos que encarar de frente o problema da medida – uma tarefa hercúlea, sem dúvida!⁹ Isso envolveria, na interpretação realista em questão, a substituição das interpretações subjetivista ou instrumentalista atuais por uma de caráter objetivo. A seu turno, isso envolveria o desenvolvimento de uma teoria de interações físicas não-locais que possibilite a atualização de potencialidades à distância. Novas concepções de causalidade seriam provavelmente requeridas.

Em conseqüência, teríamos que substituir a presente concepção do mundo como consistindo de entes localizados no espaço-tempo quadridimensional, e não influenciáveis superliminarmente, por uma concepção holista, sobre espaços com um grande número de dimensões, e talvez com uma diferente topologia. Necessariamente, novas concepções de individuação seriam requeridas.

⁷ Exponho algumas dessas razões – que não são novas, diga-se de passagem – em meu texto manuscrito “Uma breve introdução ao problema do realismo científico”; argumento mais amplamente nesse sentido em minha tese de doutorado.

⁸ Deve-se porém ressaltar que nem todos os filósofos vêem as coisas desse modo. Um exemplo importante é o nosso homenageado neste Encontro. Em um capítulo de seu *An Introduction to the Philosophy of Science* (1966), intitulado “Causality and determinism”, Carnap argumenta contra o estabelecimento de ligações entre o comportamento determinista ou não da matéria e a existência ou não do livre-arbítrio. Vejamos estas afirmações, que marcam sua divergência com relação à posição que adotei acima (e incidentalmente me apontam um aliado também famoso!): “I do not share Reichenbach’s opinion that, if physics had retained the classical position of strict determinism, we could not meaningfully speak of making a choice, uttering a preference, making a rational decision, being held responsible for our acts, and so on. I believe that all those things are entirely meaningful, even in a world that is deterministic in the strong sense.” A análise de Carnap depende, entre outras coisas, da adoção de determinadas interpretações do indeterminismo quântico, que tem sido questionadas por vários filósofos da física, à luz de desenvolvimentos recentes. Infelizmente, não disponho de espaço aqui para analisar esse interessante texto de Carnap.

⁹ Para uma análise incisiva das chamadas “provas de insolubilidade” do problema da medida quântica, ver Brown 1986a e 1986b.

Finalizo notando que a história das investigações dos problemas da microfísica apresenta duas grandes ironias:

Primeiro, Einstein recorreu ao princípio de localidade – ao qual dizia que deveríamos aderir “incondicionalmente” – para sustentar, no argumento de EPR, que a descrição quântica da realidade era incompleta. Investigando porém as condições mais gerais de possibilidade de teorias mais completas que a mecânica quântica, Bell provou, utilizando o mesmo tipo de sistema usado por Einstein, que se essas teorias tiverem que ser interpretadas realisticamente – o que Einstein também julgava essencial – elas necessariamente terão de ser não-locais!

Depois, anteriormente à refutação experimental das desigualdades de Bell, era corrente a opinião de que se isso de fato viesse a ocorrer, mais lenha seria jogada na “fogueira” de Copenhague, ou seja, haveria um reforço das interpretações anti-realistas. Eis porém que quando ficou patente a impossibilidade de teorias de variáveis ocultas locais os esforços dos especialistas salutarmente começaram a pender de modo mais visível para a elaboração de uma interpretação realista da mecânica quântica, com todas as surpreendentes características que apontei acima, e várias outras que a limitação de espaço e a natureza deste artigo não me permitiram mencionar.

Referências

- ASPECT, A., DALIBARD, J. & ROGER, G. Experimental test of the Bell's Inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters* **49** (25): 1804-7, 1982.
- BELL, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics* **1**:195-200, 1964.
- . On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Review of Modern Physics* **38**: 447-452, 1966.
- . Introduction to the hidden-variable question. In: D'ESPAGNAT 1971, pp. 171-81.
- BOHM, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden variables”, I and II. *Physical Review* **85** (2): 166-79 e 180-93, 1952.
- BOHR, N. Light and life. *Nature*, 25/3/1933, pp. 421-3, e 1/4/1933, pp. 457-9.
- . Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* **48**: 696-402, 1935.
- . Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: SCHILPP 1949, pp. 201-41, 1949.
- BROWN, H.R. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, n. 2, pp. 51-89, 1981.

- . O problema da medida em mecânica quântica: Uma avaliação das provas de insolubilidade existentes. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, n. 9, pp. 5-33, 1986a.
- . The insolubility proof of the quantum measurement problem. *Foundations of Physics*, **16**: 857-70, 1986b.
- BROWN, H.R. & REDHEAD, M.L.G. A critique of the disturbance theory of indeterminacy in quantum mechanics. *Foundations of Physics* **11**: 1-20, 1981.
- CARNAP, R. *An Introduction to the Philosophy of Science*. Ed. Martin Gardner. New York, Basic Books, 1966.
- CHIBENI, S. S. *Problemas com o Realismo em Mecânica Quântica: Uma Análise de Resultados Recentes*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, 1984.
- . A incompletude da mecânica quântica. *O Que Nos Faz Pensar*, n. 5, pp. 89-113, 1991.
- . The EPR-type incompleteness arguments, the Bell inequalities and related topics. (Manuscrito não publicado, 1987.)
- . Uma breve introdução ao problema do realismo científico. (Manuscrito não publicado, 1990.)
- . *Aspectos da descrição física da realidade*. (Tese de doutorado, em elaboração.)
- CLAUSER, J. F. & HORNE, M. A. Experimental consequences of objective local theories. *Physical Review D* **10**: 526-535, 1974.
- CLAUSER, J. F., HORNE, M. A., SHIMONY, A. & HOLT, R. A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters* **23**: 880-884, 1969.
- CLAUSER, J. F. & SHIMONY, A. Bell's theorem: Experimental tests and implications. *Reports on Progress in Physics* **41**: 1881-1927, 1978.
- CUSHING, J. T. & McMULLIN, E. (eds.) *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. Notre Dame, Indiana, University of Notre Dame Press, 1989.
- D'ESPAGNAT, B. (ed.) *Foundations of Quantum Mechanics*. Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi', Course 49. New York, Academic Press, 1971.
- D'ESPAGNAT, B. The quantum theory and reality, *Scientific American*, November, pp. 128-40, 1979.
- EBERHARD, P. H. Bell's theorem and the different concepts of locality, *Il Nuovo Cimento* **46B**: 392-419, 1978.
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review* **47**: 777-780, 1935.

- FREEDMAN, S. J. & CLAUSER, J. F. Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters* **28**: 938, 1972.
- GHIRARDI, C. G., RIMINI, A. & WEBER, T. A general argument against superluminal transmission through the quantum mechanical measurement process. *Lettere al Nuovo Cimento* **27**: 293-298, 1980.
- GLEASON, A. M. Measures on the closed subspaces of a Hilbert space. *Journal of Mathematics and Mechanics* **6**: 885-893, 1957.
- HEALEY, R. Quantum realism: Naïveté is no excuse, *Synthese* **42**: 121-44, 1979.
- HEISENBERG, W. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Trad. C. Eckart e F. C. Hoyt. Toronto and London, Dover Publications, 1949.
- JARRETT, J. P. On the physical significance of the locality conditions in the Bell arguments. *Nous* **18**: 569-589, 1984.
- KOCHEN, S. & SPECKER, E. P. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* **17**:59-87, 1967.
- PENROSE, R. & ISHAM, C. J. (eds.) *Quantum Concepts in Space and Time*. Oxford, Clarendon Press, 1986.
- PERES, A. Einstein, Gödel, Bohr. *Foundations of Physics* **15** (2): 201-5, 1985.
- POPPER, K. R. *Quantum Theory and the Schism in Physics*. London, Hutchinson, 1982.
- PUTNAM, H. Quantum mechanics and the observer. In: *Realism and Reason*. (Philosophical Papers, vol. 3.) Cambridge, Cambridge University Press, 1983. (Originalmente publicado em *Erkenntnis* **16**:193-219, 1978.)
- REDHEAD, M.L.G. *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*. Oxford, Clarendon Press, 1987.
- SCHILPP, P. A. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. 3rd. ed. La Salle, Illinois, Open Court, 1949.
- SCHRÖDINGER, E. The present situation in quantum mechanics. Trad. J. D. Trimmer. *Proceedings of the American Philosophical Society* **124** (5): 323-38, 1980.
- SHIMONY, A. Events and processes in the quantum world. In: PENROSE & ISHAM 1986, pp. 182-203.
- . Search for a worldview which can accommodate our knowledge of microphysics. In CUSHING & McMULLIN 1989, pp. 25-37, 1989.
- TAUSK, K. *A Medida na Mecânica Quântica*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, 1967.
- VAN FRAASSEN, B. C. *The Scientific Image*. Oxford, Clarendon Press, 1980.

———. The charybdis of realism: Epistemological implications of Bell's inequality. In: CUSHING & McMULLIN 1989, pp. 97-113. (Versão ligeiramente modificada de artigo com o mesmo título publicado em *Synthese* **52**: 25-38, 1982.)

VON NEUMANN, J. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Trad. Robert T. Beyer. Princeton, Princeton University Press, 1955.