

CDD:

A Dissolução Pragmático-Transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica

STEFANO OSNAGHI

Universidade Federal da Bahia
Instituto de Física
Campus Universitário de Ondina
Ondina, SALVADOR – BA
40210-340
BRAZIL

stefano.osnaghi@free.fr

Resumo: Os principais aspectos do “problema da medição” na mecânica quântica são analisados em uma perspectiva inspirada na filosofia transcendental e no pragmatismo lingüístico de viés wittgensteiniano, na trilha dos trabalhos de M. Bitbol. O objetivo é mostrar que a própria formulação do problema pressupõe um esquema epistemológico pré-crítico – ou seja – um esquema que associa a objetividade do conhecimento científico à sua capacidade de descrever adequadamente uma realidade pré-estruturada. Típica desse esquema é uma concepção representacionista das teorias, compartilhada pelas abordagens realistas e instrumentalistas tradicionais. A explicitação das raízes pragmáticas e operacionais da objetividade – raízes que são intrinsecamente ligadas às finalidades preditivas da física e que exercem sobre ela fortes vínculos constitutivos – além de facilitar a dissolução dos aspectos paradoxais do problema da medição, abre a via a uma reflexão mais geral sobre a racionalidade da física, a estrutura matemática das teorias e sua dinâmica histórica.

Palavras-chave: Física quântica. Problema da medição. Objetividade. Filosofia transcendental. Pragmatismo. Representacionismo.

1. Introdução. Objetividade e Observação

Inerente ao conceito de observação, e implicada na gramática e na etimologia do verbo *observar*, é a ideia de um ato perceptivo *dirigido para* um objeto (literalmente: “o que é posto na frente”) (Bitbol, 1996, p. 257). Se a física é por excelência a ciência baseada na observação, o poder heurístico das suas teorias – um poder que se manifesta na capacidade de antecipar os resultados intersubjetivamente atestados de observações inseridas em protocolos experimentais co-

dificados – se explica, então, em primeiro lugar, pela correspondência que elas conseguem estabelecer entre seus símbolos e as propriedades dos objetos, traduzindo em transformações matemáticas as relações causais entre diferentes configurações de propriedades. Este esquema epistemológico entra todavia em crise quando se lida com fenômenos atômicos. O formalismo quântico, embora perfeitamente adequado a antecipar estatisticamente os resultados observados em contextos experimentais bem definidos, não se deixa interpretar trivialmente como *descrição* de objetos materiais envolvidos em processos causais. Daí, o “paradoxo” de uma teoria que, apesar de ser perfeitamente apta a formular previsões objetivamente verificáveis, não se apóia em uma representação unificada e coerente da realidade; e de uma representação (aquela do “universo atômico”) que não consegue funcionar como base preditiva de uma prática cujos gestos ela contribui, portanto, para orientar.

O elemento que atrapalha a interpretação descritiva do formalismo quântico é a natureza irredutivelmente indeterminista do seu conteúdo preditivo. Em física quântica, o valor de um parâmetro observável relativo a um sistema pode ser antecipado com probabilidade 1 somente em contextos experimentais particulares, ou seja, em um conjunto restrito de “preparações” do sistema (nesse sentido, os fenômenos quânticos são ditos “contextuais”). No caso geral, e independentemente da informação disponível sobre o sistema, o formalismo associa probabilidade não-nula a *diferentes* valores do observável, tornando extremamente problemática a assunção – compatível tanto com o determinismo das leis de Newton quanto com o indeterminismo “epistêmico” da mecânica estatística clássica – de que todo parâmetro observável *possui* um valor bem definido. Numa óptica reducionista na qual à teoria quântica é atribuído o papel de teoria física fundamental, este contraste entre as estruturas preditivas clássica e quântica conduz a um segundo paradoxo, já que a teoria quântica, com seu indeterminismo intrínseco, deve justificar a emergência, dentro de um universo quântico, de fenômenos macroscópicos não-contextuais que se deixam objetivar, conforme os cânones empregados na experiência cotidiana, em uma rede de objetos dotados de propriedades.

De uma forma sutil, mas inequívoca, ambos os “paradoxos” mencionados apontam para a problemática kantiana da constituição da objetividade, a qual, não por acaso, desempenhou um papel central nas reflexões dos fundadores da teoria quântica – Bohr, Heisenberg e Pauli, em particular (Chevalley, 2000). Porém, quando a investigação sobre os “fundamentos” da nova teoria começou a se constituir como uma área de pesquisa autônoma (Freire Jr., 2004), o fio dessa reflexão não foi retomado. Enquanto o baricentro geográfico do debate deslocava-se do eixo Copenhague-Göttingen para Princeton (Home & Whitaker, 1992), em um contexto por um lado menos sensível às influências neokantianas e, por outro lado, já plenamente familiarizado com um uso “irrefletido” da teoria na solução de problemas concretos, a busca de uma reformulação total da questão da objetividade do conhecimento científico – como premissa à construção e ao uso apropriado do formalismo – foi substituída por um debate técnico sobre a “redução” do vetor de estado.

A noção de “redução”, assim como, de uma forma diferente, as “teorias de variáveis ocultas” (Bohm, 1957), visava restaurar, pela via formal, a correspondência literal entre simbolismo e realidade dificultada pela contextualidade dos fenômenos quânticos. Tais soluções não deixavam de levantar, elas mesmas, problemas específicos; mas estes problemas apresentavam a vantagem de poderem ser enfrentados no quadro familiar da dialética entre um formalismo concebido em termos descritivos e uma metafísica concebida à maneira pré-crítica.

A idéia de que a observação aja de alguma forma sobre o vetor de estado (“reduzindo-o”) emerge como corolário da assunção implícita de que, além de codificar a informação necessária a prever os resultados de medições futuras, o próprio vetor de estado reflita também as propriedades putativas dos sistemas *medidos*. A contextualidade dos fenômenos quânticos impede, geralmente, que se correlacione, de maneira determinista, a configuração física putativa decorrente de uma determinada preparação experimental com aquelas correspondentes aos resultados de uma subsequente medição. Mas a evolução temporal do vetor de estado, governada pela equação de Schrödinger, é determinista (se as *distribuições estatísticas* dos resultados esperados – a partir de uma dada preparação – não evo-

luíssem deterministicamente em função do instante em que a medição é efetuada, a teoria não teria de fato nenhum poder heurístico). A convergência em um único símbolo tanto da função preditiva (das distribuições estatísticas esperadas) como da função descritiva (das configurações físicas putativas que os resultados são supostos revelar) produz, então, uma tensão que deve ser compensada *desdobrando* a dinâmica da teoria. É precisamente esta a função desempenhada pelo “postulado de projeção” introduzido por J. von Neumann em 1932 (1955, cap. 5): a de quebrar de maneira não determinista a evolução “unitária” (ou seja: contínua, determinista e reversível) do vetor de estado em concomitância com o ato de observação.

A assunção dissimulada da dimensão descritiva do vetor de estado (van Fraassen, 1991, p. 245-50), compartilhada por von Neumann e pela maioria dos seus críticos, fica particularmente evidente na teoria quântica da medição (proposta originariamente por von Neumann e tornada paradigmática em seguida), onde o aparelho de medição, e até o próprio observador, é representado explicitamente por um vetor de estado¹. E é precisamente a esta ambigüidade do estatuto do vetor de estado que nós devemos, segundo U. Mohrhoff (2002, p. 223), aquele “conjunto de pseudoproblemas” sobre o qual uma completa “indústria dedicada a gerar soluções gratuitas” tem construído a sua fortuna²: quer tentando desembaraçar-se do postulado de projeção, quer procurando “explicá-lo” – sem, num caso como no outro, realmente sair do quadro da teoria neumanniana da medição³. A marca do esquema epistemológico representacionista fica de fato patente tanto nas propostas de solução “dualista” (a “redução do pacote de ondas” seria determinada pela intervenção da consciência do observador no mundo material⁴) como nas propostas “monistas”, inspiradas pelo trabalho de H. Everett

¹ Para uma ilustração crítica do argumento de von Neumann, inspirada nas objeções formuladas por H. Margenau, ver van Fraassen (1991, p. 250-7).

² Cf. Jammer (1974, p. 470-521); d’Espagnat (1976, p. 159-229); Wheeler & Zurek (1983). Para um exame atualizado e uma lista de referências, ver Pessoa Jr. (1992).

³ Para uma resenha dos aperfeiçoamentos e das generalizações da formulação original de von Neumann, veja-se, por exemplo, a discussão em d’Espagnat (1976, parte quarta).

⁴ Cf. Bitbol (2000a, cap. 1).

(1957) (um único vetor de estado global, cuja evolução unitária não seria quebrada por nenhuma “redução”, refletiria a verdadeira estrutura, múltipla e complexa, do universo atual, inclusive dos observadores⁵).

Entretanto, a sobreposição mal resolvida entre plano descritivo e plano preditivo aparece também nas abordagens ao problema da medição aparentemente mais próximas da ortodoxia de Copenhague – aliás, reverberando um dualismo bem notório aos exegetas de Bohr (Faye & Folse, 1994), cuja concepção instrumentalista do formalismo articulava-se com uma reflexão epistemológica integralmente centrada sobre a noção de *descrição* da natureza (Honner, 1987). Esse é o caso tanto do antigo programa que visava mostrar a redundância do postulado de projeção com base em uma análise de tipo termodinâmico dos sistemas macroscópicos (cf. Jammer, 1974, p. 490-3; d’Espagnat, 1976, cap. 16), como daquele, hoje em voga, que visa alcançar o mesmo objetivo explorando, no quadro de uma interpretação informacional do formalismo, os mecanismos dissipativos que se produzem na escala macroscópica (Zurek, 1991; 2004). O problema é que, enquanto o conceito de informação não deixa de *pressupor* um esquema bipolar sujeito-objeto, tais abordagens não renunciam à pretensão de fechar o “círculo epistemológico”⁶ descrevendo *nos próprios termos da teoria* as projeções objetivadas desses dois pólos.

Embora concebido numa moldura conceitual inspirada diretamente na filosofia transcendental, o programa desenvolvido nos anos 70 por C. F. von Weizsäcker (1979;1980) não é imune a uma crítica análoga (J. Habermas, 1982, p. 328-9). É um mérito inegável de von Weizsäcker ter apontado com clareza, no rastro das reflexões da escola de Copenhague-Göttingen, a conexão entre estrutura da teoria quântica e condições de possibilidade da física enquanto prática de antecipação da experiência, criando, assim, as premissas para uma compreensão da eficácia dessa prática desvinculada da idéia da correspondência entre uma realidade pré-estruturada e sua representação teórica. Contudo, a perspectiva episte-

⁵ Cf. Barrett (1999); Butterfield (2001). Estas soluções são discutidas na seção 4.

⁶ Para uma discussão crítica da noção de “círculo epistemológico” (introduzida por A. Shimony, 1993) em relação ao problema da medição, ver Bitbol (2001).

mológica de von Weizsäcker não deixa, em última análise, de ter um componente representacionista que se expressa na ambição de fechar, em um único círculo intra-teórico, as *precondições* da ciência e seu *produto* objetivado⁷. Este tipo de dificuldade é, aliás, típico das tentativas de naturalização do transcendental. Seguindo F. Varela, M. Bitbol reconhece, por exemplo, o papel que os paradigmas auto-organizacionais das ciências cognitivas podem desempenhar como antítese em “um processo dialético que visa nos liberar dos esquemas dualistas e fundacionistas” (Bitbol, 2001, p. 40). Por outro lado, isto não impede de constatar os limites metodológicos de uma perspectiva que não pode dar conta do fato de que “toda *descrição* das relações constitutivas da cognição é ela mesma dependente de um procedimento preliminar de constituição” (Bitbol, 2000b, p. 99, grifo meu).

Se então – como o sustentarei neste artigo – é justamente a filosofia transcendental que nos fornece a chave da dissolução do problema da medição⁸, esta chave requer, para ser usada proficuamente, o abandono definitivo da busca de um nexos entre objetividade e representação. Cumprido este passo essencial, a explicitação da natureza intrinsecamente operacional do formalismo quântico e a conseqüente crítica dos elementos representacionistas implícitos na “teoria da medição” tornam completamente supérfluo o jogo de dualismos introduzido pelo postulado de projeção como resíduo do esquema bipolar da teoria do conhecimento. Seguindo M. Bitbol, uma tal perspectiva pode ser construída a partir da crítica fenomenológica da epistemologia dualista e da análise pragmatista da linguagem de inspiração wittgensteiniana (Bitbol, 1996, cap. 4; 1998a, p. 9-20; 2000a, p. 97-110). Em sua abordagem “pragmático-transcendental” da mecânica quântica, Bitbol (1996, 1998b) desenvolve uma releitura orgânica dos argumentos boh-

⁷ Um típico exemplo de sobreposição entre “auto-reflexão” e “auto-objetivação” é constituído, em von Weizsäcker, pela evocação de uma relação entre os *a priori* cognitivos do sujeito e os vínculos biológicos da espécie em seu percurso evolutivo (von Weizsäcker, 1979, p. 135-8).

⁸ Para um exame exaustivo das diversas abordagens transcendentais da mecânica quântica, ver Kauark-Leite (2004). As diferentes leituras transcendentais de Bohr são analisadas em Honner (1987, p. 9-14).

rianos à luz do segundo Wittgenstein⁹, chegando a propor uma reformulação dos tópicos principais da filosofia da física – notadamente a questão da adequação empírica das teorias e a questão de sua convergência no plano histórico – que convida a sair do horizonte das abordagens “semânticas”, dominado pela dialética realismo/anti-realismo (Bitbol, 1998a, cap.1). Neste estudo tentarei avaliar a pertinência dessas ambições no que diz respeito ao problema da medição – que constitui, ao mesmo tempo, um campo de teste crucial e um terreno particularmente favorável à exploração das potencialidades da abordagem pragmático-transcendental.

2. “Emaranhamento” e Redução

Os vários aspectos do problema da medição emergem de uma raiz comum: uma concepção “descritivista” do simbolismo inspirada na estrutura predicativa da linguagem ordinária (Park, 1973, p. 216-7; Dieks, 1989, p. 440; van Fraassen, 1991, p. 274-7; Fuchs & Peres, 2000, p. 71; Mohrhoff, 2002, p. 2-4). Esta concepção – geralmente considerada viável pelas teorias da física clássica – choca-se, no caso do formalismo quântico, com a presença de observáveis “incompatíveis” e dos chamados estados “emaranhados” (*entangled*). Ao invés de procurar reabsorver as implicações da incompatibilidade e do emaranhamento nos cânones da concepção descritivista, seguiremos aqui o caminho oposto, tentando desarticular esta concepção a partir de uma análise *operacional* daquelas implicações.

Do ponto de vista operacional, um experimento se caracteriza pela relação que ele instaura entre duas seqüências de operações: aquela que constitui convencionalmente a “preparação experimental de um determinado sistema” e aquela que constitui convencionalmente a “medição de um determinado grupo de observáveis”. A reprodutibilidade – condição constitutiva do experimento – requer que *toda* preparação reconhecida como tal determine (univocamente) as dis-

⁹ O próprio Heisenberg, em uma alusão pouco comentada, chegou a sugerir explicitamente este tipo de leitura (Stapp, 1972, p. 1114).

tribuições estatísticas dos resultados que podem ser encontrados num determinado grupo de medições. Não se pode, contudo, afirmar inversamente que a *toda* distribuição imaginável corresponda uma preparação real. Por exemplo, supondo querer medir o momento P e a energia cinética T de uma partícula de massa m em movimento livre unidimensional, não existe nenhum valor da energia pelo qual a distribuição estatística dos resultados *não* satisfaça a fórmula $T=P^2/2m$. Esse vínculo funcional implica que a um valor de T correspondem *dois* possíveis valores de P . Todavia, é sempre possível imaginar uma preparação da partícula que, além de atribuir probabilidade 1 à ocorrência do valor T_k em uma eventual medição de T , atribui probabilidade 1 *também* à ocorrência de *um* valor específico p_i (compatível com o vínculo) caso se resolva medir P . A possibilidade de encontrar uma tal preparação – compatível com a atribuição simultânea de um valor preciso a *ambos* os observáveis – é justamente o que distingue, em física quântica, os pares de observáveis compatíveis dos pares de observáveis incompatíveis. No caso de uma partícula “quântica”, por exemplo, a posição X é incompatível com o momento P . As preparações que atribuem probabilidade 1 a uma dada posição *não podem* ser refinadas de tal forma que seja possível atribuir *também* probabilidade 1 a um dado valor do momento. Embora não exista uma relação funcional entre X e P , as respectivas distribuições estatísticas estão rigidamente vinculadas pelas chamadas “relações de incerteza” e não podem ser ambas deterministas¹⁰. Isso significa que, no âmbito do modelo quântico da partícula e de sua tradução em termos de seqüências codificadas de operações, é impossível encontrar uma preparação que leve a distribuições estatísticas em contraste com as relações de incerteza.

Como foi posto em evidência por A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen (1935) (por um argumento que se tornou conhecido sob o nome de “EPR”), as implicações da incompatibilidade tornam-se críticas quando se consideram as correlações de dois sistemas que interagiram. Em um modelo que não contempla observáveis incompatíveis (como, por exemplo, aquele da colisão de duas bolas

¹⁰ Em geral, os operadores que representam observáveis incompatíveis são ligados por uma relação geométrica forte: a mútua transformabilidade por uma “rotação” no espaço de Hilbert (para uma visualização, ver Hughes, 1989, p. 99-107).

em uma mesa de sinuca), estas correlações são perfeitamente antecipadas imaginando-se que a preparação experimental fixe univocamente as propriedades dos sistemas individuais e considerando os vínculos dinâmicos que a interação introduz entre estas propriedades. A situação é todavia bem diferente em modelos que incluem observáveis incompatíveis, como, por exemplo, aquele de dois átomos que colidem em uma cavidade supercondutora (Osnaghi *et al*, 2001). Aqui, a forma *emaranhada* do vetor de estado global após a interação indica precisamente que a estrutura atômica do cálculo probabilista kolmogoroviano, com seu jogo de “pressupostos de conotação ontológica” (Bitbol, 1996, p. 34), é inadequada para dar conta do conjunto das correlações observadas. Nessas condições, o sistema global não pode mais ser concebido como composto de entidades distintas dotadas de propriedades físicas individuais reveladas (ainda que indiretamente) pela observação. Nenhum modelo que suponha a existência, atrás dos observáveis usuais, de propriedades “reais”, cujos valores seriam fixados univocamente pela preparação experimental, tem condições de reproduzir as correlações observadas (não pelo menos se se aceitarem razoáveis vínculos de não-contextualidade das propriedades e de localidade de suas influências recíprocas¹¹).

O emaranhamento é evidentemente o traço da estrutura preditiva quântica que mais atrapalha as tentativas de interpretar o vetor de estado como reflexo direto ou indireto das propriedades de um sistema. Mas as sugestões erigidas pela analogia aparente com a mecânica estatística clássica¹² – onde a função que os pontos do espaço de fase desempenham no esquema preditivo é atribuída precisamente à capacidade deles de *representar* as propriedades cinemáticas de um *ensemble* estatístico de sistemas a um dado instante¹³ – não se deixam contornar tão facilmente. O próprio termo “vetor de estado” veicula, aliás, essa ambigüida-

¹¹ Este resultado, formalizado no célebre teorema de J. S. Bell (1964), foi em seguida estendido e generalizado (cf. por exemplo Mermin, 1991); para uma ampla resenha recente, que inclui os testes experimentais dos modelos realistas-locais, ver Shimony (2005).

¹² Cf. Mohrhoff (2001b, p. 11).

¹³ Esta interpretação da mecânica hamiltoniana é, contudo, fruto de uma visão idealizada, que não é sustentada pela análise aprofundada da sua estrutura preditiva (Hughes, 1989, p. 74-7).

de (Bitbol, 2000a, p. 72-83), pois ele faz referência ao suposto “estado físico” do sistema (ou do *ensemble*). A tensão entre a dimensão preditiva e a dimensão descritiva do simbolismo chega ao cume no instante em que um dos resultados *a priori* possíveis é irrevogavelmente projetado na atualidade pela medição. Se, por trás desse resultado, pretende-se ver uma propriedade física do sistema, a qual, por sua vez, está refletida no seu vetor de estado, é natural requerer que esse vetor *após* a medição possua as mesmas características de intersubjetividade e estabilidade que são constitutivas do próprio resultado encontrado. Tipicamente, o conteúdo preditivo do vetor selecionado deverá exibir propriedades similares àquelas do conteúdo disposicional de um *predicado* na linguagem ordinária.

Assumindo a regra de Born pela dedução das probabilidades a partir de um vetor de estado, o único vetor que satisfaz esses requisitos (assegurando, em particular, a reprodutibilidade do resultado em caso de repetição imediata da medição) é um *auto-estado* do observável medido A, ou seja, um vetor que atribui a um dos valores de A probabilidade *incondicional* 1. Nem as superposições lineares de auto-estados de A nem um estado emaranhado onde apareçam produtos tensoriais que incluam como fatores os auto-estados de A possuem a mesma propriedade, já que ambos atribuem probabilidade não nula a valores diferentes de A. De acordo com este raciocínio, após a medição o sistema encontra-se necessariamente num auto-estado de A. Por outro lado, em geral, uma superposição linear de auto-estados ou um estado emaranhado são justamente o tipo de vetor que é preciso associar à preparação experimental para obter previsões adequadas para um espectro de medições que inclui observáveis incompatíveis com A. A necessidade de recorrer a tais estados nos recorda que, quando se lida com fenômenos atômicos, é geralmente impossível ligar deterministicamente *um* resultado de medição a uma dada preparação. Como corolário dessa impossibilidade, a seleção do auto-estado putativamente associado ao sistema *após* a medição não pode ser delegada à evolução unitária e requer um mecanismo formal *ad hoc* que “reduza” de maneira abrupta e não determinista o vetor de estado representativo do sistema *antes* da medição.

O desconforto suscitado pelo postulado de projeção deve-se principalmente às formas de dualismo que ele introduz explicitamente ou deixa vislumbrar entre suas implicações. Dualismo das evoluções temporais, em primeiro lugar. Mas também, no âmbito de uma visão materialista, dualismo latente entre física macroscópica e física microscópica, já que a incompatibilidade de um algoritmo preditivo que inclui estados emaranhados com uma atitude realista cuja eficácia é continuamente constatada na experiência cotidiana, parece sugerir que a “redução” do estado esteja ligada ao *tamanho* dos sistemas estudados, ocorrendo em algum nível intermediário entre fenômenos atômicos e fenômenos macroscópicos. Ou, alternativamente, dualismo ontológico mente-matéria para justificar uma possível ação da consciência no processo de redução do estado – processo que restaria de outra forma completamente indeterminado quanto a sua origem e sua localização temporal. Prescindindo dessas implicações, o postulado de projeção pode, em primeiro lugar, ser criticado pela fraqueza da sua base empírica. Como tem sido mostrado por vários autores (cf. por exemplo Park, 1973; van Fraassen, 1991, cap. 8), se se aceitar uma interpretação puramente preditiva do formalismo quântico, assumindo a natureza intrinsecamente condicional das predições da física (ou seja, sua inseparabilidade da “enumeração das condições externas” que definem univocamente o contexto experimental (Bohr, 1939, p. 47)), a redução do vetor de estado não é necessária para assegurar a objetividade dos resultados das medições. Quando o contexto for adequadamente especificado, apontando não somente os procedimentos de preparação, mas também todos os graus de liberdade correlacionados com os observáveis a serem medidos, o vetor de estado correspondente a este contexto – de forma geral emaranhado – antecipa corretamente os resultados estatísticos de *todos* os testes experimentais que podem ser efetuados, inclusive aqueles que realizam medições repetidas (para testar a reprodutibilidade imediata dos resultados) e metamedições (para testar o acordo intersubjetivo entre diferentes observadores) (van Fraassen, 1991, p. 250-7).

Se prescindirmos da possível conotação descritiva do vetor de estado, não há então razão para se atribuir ao postulado de projeção outro significado do que aquele de uma simplificação do formalismo válida em casos particulares: isto

é, quando não é possível testar as correlações entre os graus de liberdade convencionalmente associados ao “sistema” e os graus de liberdade convencionalmente associados a seu ambiente. Se, ao contrário, uma parte dos graus de liberdade do ambiente fica sob o controle experimental, e um espectro suficientemente amplo de correlações sistema-ambiente pode ser efetivamente testado, o recurso explícito a estados emaranhados *não reduzidos* não pode ser evitado. Mais importante: este é precisamente o caso quando se consideraram situações físicas que realizam *concretamente* modelos de medição repetida, como já pode ser visto em experimentos reais (Nogues *et al*, 1999; Bertet *et al*, 2002). Este fato não deveria surpreender. Sendo atestável só por uma série de procedimentos físicos, a objetividade de um resultado se identifica com um conjunto de *predições* sujeitas à jurisdição do formalismo quântico e, por consequência, irredutivelmente contextuais. Mais do que os estados “reduzidos” (com sua suposta capacidade de tornar viável a interpretação descritiva do formalismo), são então os estados emaranhados a entrar explicitamente na atestação da objetividade dos resultados.

A redução da objetividade de um resultado a puro conteúdo disposicional, ou seja, a um conjunto de predições que se referem a *outros* resultados, aparece, é verdade, exposta a um risco de circularidade. A tentativa de estabelecer uma ponte entre o vetor de estado e o “estado real” de um sistema físico, que “existe objetivamente e independentemente de toda observação ou medição” (Einstein, 1953, *apud* Scheibe, 1973, p. 173), responde precisamente a exigência de quebrar este círculo, providenciando um *fundamento* ontológico às características objetivas dos resultados. Mas, do ponto de vista pragmático, a busca de um tal fundamento é tanto ilusória quanto inútil. Por um lado, como temos visto, a *consistência* dos modelos quânticos do processo de medição com os requisitos de objetividade demandados aos resultados não precisa se apoiar sobre alguma hipótese metafísica. Por outro lado, a interdependência dos fatos que permitem definir pragmaticamente um resultado (como algo que é *indicado* por um conjunto de fatos) não é um defeito, mas sim uma característica constitutiva do conhecimento científico. Enquanto “teoria da predição de alternativas empiricamente decidíveis” (von Weizsäcker, 1980, p. 225) e prática que consiste em correlacionar

fatos de maneira reproduzível (Bitbol, 1996, p. 68-75; 2000a, p. 310; cf. também Mohrhoff, 2002, p. 221), a física ao mesmo tempo *pressupõe e contribui a criar* um tecido factual intersubjetivamente reconhecível e relativamente estável (embora não estático nem rígido se considerado em uma perspectiva histórica¹⁴) sobre o qual possa ser definida uma estrutura verifuncional. *Antes* de poder ser projetada sobre um fundo ontológico, a objetividade de um resultado de medição se constitui autonomamente num plano puramente pragmático-comunicacional¹⁵.

Uma segunda objeção, mais geral, contra a leitura puramente preditiva do formalismo implicada nas conclusões precedentes consiste em frisar o caráter estéril da posição instrumentalista, a qual se limitaria a *constatar a posteriori* a eficácia do formalismo na organização dos fatos, sem oferecer nenhuma explicação plausível do sucesso da física. Entretanto, a idéia de um círculo dinâmico onde o formalismo se co-constitui com os fatos, no âmbito de uma prática que visa inserir os fatos em seqüências operacionais em princípio reproduzíveis e elaborar modelos que permitam ler determinados acontecimentos como resultados de uma preparação experimental, é, em si, perfeitamente apta para dar conta da eficácia da física. Os traços estruturais do formalismo quântico, e seu poder heurístico, ao invés de serem interpretados como reflexos de uma realidade pré-constituída, podem de fato ser postos diretamente em relação com estas finalidades pragmáticas. Não somente o esqueleto global da teoria, isomorfo a um espaço vetorial, constitui de fato o ambiente matemático ideal para representar um esquema preditivo probabilista (Hughes, 1989, cap. 3; Bitbol, 1996, cap. 2), mas os próprios traços dos modelos particulares empregados em física atômica podem ser conexos a vínculos de ordem pragmática. Um modelo tem que ser suficientemente abstrato para poder ser empregado em infinitas situações contingentes; e,

¹⁴ Cf. Bitbol (1996, p. 73-5).

¹⁵ Esta observação generaliza e radicaliza o *refrain* bohriano de que “[...] o escopo de todo experimento físico – ganhar conhecimento sob condições reproduzíveis e comunicáveis – não nos deixa outra escolha de que usar conceitos quotidianos, talvez refinados pela terminologia da física clássica, não só em toda exposição relativa à construção e à manipulação dos instrumentos de medição, mas também na descrição dos próprios resultados experimentais” (Bohr, 1958, p. 25-6).

por outro lado, suficientemente “auto-referencial” para poder, no âmbito dessas situações, aplicar-se a um conjunto fechado de fatos, desprezando a interdependência constitutiva desses fatos com *todos* os outros. Se o primeiro vínculo pode ser conexo, por exemplo, com o emprego de uma parametrização espaço-temporal, o segundo implica, no contexto dessa parametrização, uma série de condições de invariância rototranslacional e de continuidade que incidem diretamente na forma da dinâmica e nas relações estruturais entre observáveis¹⁶.

“O conceito de experimentação – afirma Bitbol – não supõe um objeto *ao qual* se refere o experimento. Ele supõe simplesmente objetos *por meio dos quais* agir” (Bitbol, 1996, p. 258). A noção de objeto desempenha certamente um papel central na definição do quadro pragmático no qual a física se exerce, bem como na elaboração de seus modelos teóricos (Van Fraassen, 1980, p. 80-3). Contudo, a física quântica tem tornado evidente a fragilidade de um esquema que pretende derivar a objetividade do conhecimento científico dos objetos supostamente visados pela investigação experimental (Bitbol, 1998a, p. 79; von Weizsäcker, 1979, p. 146). A complementaridade bohriana (Rosenfeld, 1961; Jammer, 1974, p. 104-5), bem como a elaboração, no quadro de lógicas não-clássicas, de noções “fracas” de objeto e propriedade (Mittelstaedt, 1994), podem ser lidas¹⁷ como umas tentativas (inspiradas na tradição kantiana) de lidar com as falhas desse esquema sem, todavia, sair daquele “horizonte estável” da filosofia ocidental que Aage Petersen, aluno e colaborador de Bohr, chamava de “modo ontológico de pensamento” (Petersen, 1968, p. 128).

3. “Descoerência” e Mundo Macroscópico

A discussão precedente nos leva ao segundo aspecto do problema da medição, que concerne à capacidade da mecânica quântica de dar conta de nossa experiência mais imediata e, mais especificamente, a possibilidade de reduzir a física clássica à física quântica. Expresso nos termos metafóricos do “gato de

¹⁶ O assunto é aprofundado na seção seguinte.

¹⁷ Cf. Bitbol (1996, p. 256-62).

Schrödinger”, o problema é o de explicar por que se encontram gatos vivos e gatos mortos, mas nunca gatos em uma “superposição” desses dois estados biológicos, embora, admitindo a universalidade da teoria quântica, seja em princípio lícito imaginar situações onde o vetor de estado do gato estaria emaranhado com aquele de um sistema microscópico, tal como um átomo (Schrödinger, 1935). A impressão é que, na ausência de mecanismos internos à teoria capazes de justificar a *não-ocorrência* de certas superposições na escala macroscópica, a validade universal da mecânica quântica seria posta em questão justamente por nossas experiências mais familiares. As duas vias deixadas abertas por esse dilema têm sido exploradas: aquela de verificar a emergência, em sistemas quânticos com infinitos graus de liberdade, de “regras de seleção” que excluam certas superposições de estados (Bub, 1988) e aquela de “generalizar” a dinâmica unitária dos sistemas quânticos, introduzindo um mecanismo *ad hoc* capaz de induzir a “localização” dos sistemas macroscópicos (Ghirardi, Rimini & Weber, 1986).

À luz de nossa crítica à concepção descritivista do vetor de estado, essa maneira de apresentar o problema se mostra, contudo, completamente inadequada. O *objeto* “gato” da linguagem ordinária não pode ser automaticamente identificado com um *sistema físico* G . Esta identificação tem que ser *construída* quando se define operacionalmente o sistema G e seus observáveis – o que só permite de atribuir a G um vetor de estado. Por essa razão (entre outras), não faz sentido perguntar, por exemplo, por que percebemos “uma realidade com alternativas e não uma superposição coerente de alternativas” (Zurek, 1991, p. 37) ou se as “superposições macroscópicas [...] existem na natureza” (Leggett, 1987, p. 98). O problema das “superposições macroscópicas” tem que ser posto em um contexto experimental bem definido, e isto não em obediência a algum dogma positivista (Leggett, 1987, p. 87), mas simplesmente porque a associação de um vetor de estado a um sistema *subentende* a possibilidade de especificar as operações que constituem a preparação e as medições implicadas por este vetor. Isto significa, por exemplo, que uma pergunta aparentemente legítima e inequívoca, como aquela de por que não se observa interferência em um experimento de

Young com bolas de tênis, pressupõe, em realidade, a definição de um quadro semântico específico que torne explícitas suas implicações operacionais.

Em primeiro lugar, a “posição das bolas” tem que ser definida *operacionalmente* como observável *quântico* X . Fora do esquema que concebe os observáveis como reflexo de propriedades de um sistema, as seqüências de operações que definem uma medição e os fatos que indicam um determinado resultado são selecionados através de um processo construtivo complexo, que deve assegurar a consistência performativa com o restante da prática experimental e com os modelos empregados. As drásticas simplificações introduzidas pelos experimentos de pensamento (*gedankenexperiments*) freqüentemente empregados nesse contexto não são, em muitos casos, inócuas sínteses dos aspectos conceitualmente relevantes de situações tecnicamente muito complexas; elas falham em dar conta de um aspecto *crucial* do problema, ou seja, do fato de que os observáveis não são o reflexo de uma realidade pré-constituída, mas são um produto da *prática* científica.

Em segundo lugar, a definição completa do contexto experimental nos obriga a levar em conta *todos* os possíveis observáveis quânticos que poderiam estar correlacionados com X , notadamente aqueles referidos ao “ambiente”. De fato, a distribuição dos valores de X é determinada por um vetor de estado *global* que inclui os graus de liberdade relativos ao ambiente. A forma desse vetor (em geral emaranhado) é selecionada dinamicamente pelo acoplamento entre o sistema-bola e o ambiente, através de um mecanismo dissipativo chamado de *descoerência* (Zurek, 1991). Cabe então às teorias da descoerência demonstrar que as predições que podem ser deduzidas desse estado emaranhado concordam com os modelos empregados nas mesmas situações pela física clássica.

Se se aceitar uma perspectiva construtivista, nem a ausência de um “princípio de superposição” nas estruturas preditivas clássicas nem, por outro lado, a descoberta de que este tipo de estruturas pode ser derivado da mecânica quântica parecem especialmente enigmáticas. Os modelos clássicos, com seus sistemas e seus observáveis, são o fruto de um longo e complexo trabalho de seleção, de elaboração conceitual e de organização da experiência objetivando precisamente

cumprir exigências preditivas *deterministas*. É natural, portanto, que, para estes modelos, a notável “capacidade representacional do espaço de Hilbert” (Hughes, 1989, p. 107) pareça redundante. Por outro lado, como vamos argumentar a seguir, a generalidade da teoria quântica e sua capacidade de incluir, como caso particular, estruturas isomorfas aos modelos clássicos, podem ser justificadas no quadro de uma abordagem integralmente pragmática, isto é, sem evocar alguma hierarquia ontológica entre fatos ou objetos microscópicos e fatos ou objetos macroscópicos.

A maioria dos autores que empregam a descoerência na solução do problema da medição não se contentam, todavia, em garantir a compatibilidade das estruturas preditivas clássicas e quânticas em regime macroscópico, mas cultivam o projeto reducionista de demonstrar a própria “emergência do mundo clássico” no âmbito de um universo quântico (Zurek, 1991). Por “mundo clássico” entende-se o conjunto de fatos que é pressuposto pelo exercício da física atômica e que é expresso por meio da armação lingüístico-conceitual da vida cotidiana. “A questão de explicar o caráter clássico do mundo quotidiano torna-se a questão de saber se é possível *derivar* do interior da mecânica quântica as condições para *descobrir e praticar* a própria mecânica quântica e assim, nas palavras de Shimony (1993), fechar o círculo” (Bacciagaluppi, 2005). No ambicioso projeto de dar conta, por um processo completamente naturalizado, da própria elaboração do quadro conceitual e factual onde a física age, reconhece-se, ainda, a confusão entre o plano do conteúdo objetivado do conhecimento científico e o quadro pragmático e conceitual no qual este conhecimento é construído e verificado. O procedimento constitutivo da rede dos fatos e de sua organização em termos de sistemas e observáveis, um procedimento que se desenrola no plano histórico-social da prática científica, é assim projetado na metáfora da emergência de um mundo clássico e, dentro desse mundo, de observadores sencientes darwinianamente selecionados por sua capacidade de explorar as potencialidades preditivas inscritas nele (Saunders, 1993; Zurek, 2004).

Nesse quadro, onde a concepção descritivista do vetor de estado é levada às últimas conseqüências, o domínio da experiência humana se reduz às corre-

lações existentes, no âmbito da função de onda universal (um gigantesco estado emaranhado), entre vetores representantes dos “estados de memória” dos observadores e vetores representantes do “estado físico” dos outros sistemas (Everett, 1957). As propriedades dos objetos macroscópicos reduzem-se a grupos de correlações particularmente estáveis (e, por consequência, intersubjetivamente verificáveis), quando for considerada a capacidade limitada das memórias de recuperar a informação contida nas correlações “parasitas” que os sistemas macroscópicos desenvolvem com o ambiente por efeito do seu insuficiente isolamento (Zurek, 2004). A descoerência é aqui empregada para mostrar que os sistemas macroscópicos possuem uma classe muito restrita de estados “estáveis” selecionados pela interação dissipativa com o ambiente, e que essa classe é isomorfa à gama de propriedades que lhe são usualmente atribuídas (Joos & Zeh, 1985). Demonstrada dessa maneira a “existência objetiva” de propriedades macroscópicas, a definição dos observáveis “microscópicos” se deduziria automaticamente, sendo determinada pela forma do acoplamento dinâmico entre os sistemas microscópicos e aparatos de medição cujos estados estáveis são previamente selecionados pela descoerência (Zurek, 1981; 1998). A forma peculiar (não-clássica) das distribuições estatísticas observadas nas experiências de física atômica poderia, enfim, ser explicada aplicando considerações estatísticas de tipo clássico às estruturas “autônomas” que aparecem na função de onda universal por efeito da descoerência¹⁸.

Assim, o “círculo” estaria fechado: partindo de uma representação em termos de vetores de estado que refletem uma realidade última (de partículas ou campos elementares e de suas interações), se deduziria a estrutura factual do mundo ordinário, chegando até a explicar “por que os seres sencientes que nós conhecemos [...] têm os conceitos particulares que eles têm, para descrever seu mundo” (Vaidman, 2002). Os próprios argumentos transcendentais de Bohr so-

¹⁸ Em realidade, significativamente, a justificação das *predições* da teoria padrão a partir de uma interpretação integralmente descritiva dos vetores de estado constitui um dos principais problemas em aberto para as abordagens everettianas (Kent, 1990; Barrett, 1999; ver Wallace, 2003, para um panorama das abordagens mais recentes).

bre a necessidade de situar as experiências quânticas em uma moldura “clássica” tornariam-se nessa óptica supérfluos. O estabelecimento de uma “fronteira entre clássico e quântico”, o confinamento de “certos objetos – especialmente os aparelhos de medida e os observadores – do lado clássico” e a “suspensão por decreto do princípio de superposição no domínio macroscópico” (Zurek, 2004, p. 716) apareceriam como preceitos inúteis no quadro unitário da teoria everettiana enriquecida pela descoerência. Um quadro onde, realizando as ambições originais de Everett (1957), a teoria providenciaria “as ferramentas-chave para a sua própria interpretação” (Zurek, 1998, p. 1795), chegando a abranger “as condições da sua própria verificação experimental” (Omnès, 1992, p. 340).

O projeto de “[...] dar conta da existência dos dados factuais que entram [na] verificação experimental [da teoria]” (*ibidem*) exerce, todavia, um fascínio limitado aos olhos do pragmatista. Mesmo admitindo que seja possível obter uma teoria consistentemente interpretável como descrição das estruturas elementares do universo, e supondo que a “aparência” dos fatos macroscópicos se deixe derivar dessa descrição quando os observadores são incluídos nela, o tipo de fundamento que a descrição teórica ofereceria ao mundo macroscópico não seria tão diferente daquele que, na metáfora wittgensteiniana, a pedra pintada oferece ao castelo pintado. Isto não quer dizer que um reducionismo “de cima para baixo” (*top-bottom*), no qual a existência das configurações físicas microscópicas seria subordinada àquela dos fatos macroscópicos que as “indicam”¹⁹, represente, para o pragmatista, uma alternativa mais viável do que a do reducionismo “de baixo para cima” (*bottom-top*) das abordagens neo-everettianas. Já que a “verdade” de uma proposição física depende da sua capacidade de inserir-se coerentemente numa rede de proposições aceitas, e que o estabelecimento de um fato implica a

¹⁹ Uma posição similar é às vezes impropriamente atribuída a Bohr (Shimony, 1963; Leggett, 1987, p. 87). Para uma análise dos principais argumentos contra o programa fenomenista nesse contexto, ver Bitbol (1996, p. 290-3); cf. também Shimony (1963, p. 762-3). Levando em conta estas objeções, Mohrhoff (2001a) tem defendido uma forma de reducionismo “*top-bottom*” ligada às características ontológicas particulares que ele atribui ao espaço-empo.

sua coordenação com uma rede infinita de outros fatos, nenhum fato *estabelecido* pode funcionar de *fundamento*²⁰.

Fatos macroscópicos e fatos microscópicos têm, então, exatamente o mesmo estatuto – sendo essencial para defini-los só a condição, construída na prática social da pesquisa, de serem intersubjetivamente reconhecidos e se inserirem de maneira consistente no tecido factual já aceito (Bitbol, 1996, p. 68-75). Fora de toda perspectiva fundacionalista, regime clássico e regime quântico representam simplesmente dois conjuntos de fatos e operações organizados conforme classes de modelos diferentes. A física “microscópica” corresponde, portanto, a uma extensão “horizontal” da atividade de pesquisa da física clássica, com a inclusão de novas seqüências de fatos e ações codificadas conforme os modelos figurativos atomistas, e correlacionadas conforme a teoria quântica. A expectativa de que o formalismo preditivo de tipo clássico possa ser considerado como um caso particular do formalismo quântico traz então sua legitimidade não de uma suposta aderência desse último às estruturas mais elementares do mesmo “mundo” que as teorias clássicas descrevem, mas, sim, da natureza comum dos procedimentos de objetivação da prática experimental, quer no regime “macroscópico” quer no regime “microscópico”. A presença de observáveis incompatíveis nos modelos quânticos implica uma estrutura preditiva mais geral do que o esquema determinista baseado nos axiomas kolmogorovianos e na álgebra de Boole. Daí a maior generalidade da teoria quântica, uma generalidade que reflete a precedência da qual ela goza no plano transcendental. Enquanto expressão mais direta das condições de possibilidade da prática experimental, “[...] o carço estrutural da mecânica quântica se identifica com o modo mais geral de cálculo das probabilidades de eventos definidos relativamente a um contexto experimental [específico]” (Bitbol, 1996, p. 421).

Estas considerações permitem desenhar os contornos de uma perspectiva reducionista completamente original, que se apóia na hipótese de que os fatos físicos não refletem algum fundo rígido e imutável, mas, pelo contrário, con-

²⁰ Cf. Bitbol (2001, p. 60). Estes argumentos são inspirados nas reflexões de *Da Certeza* (Wittgenstein, 1969).

figuram-se como uma rede complexa que se co-constitui dialeticamente com o formalismo preditivo. Como o resume Bitbol, parafraseando a análise da aritmética de Wittgenstein, “os ‘fatos’ que vinculam estas regras [do formalismo] não preexistem ao seu uso” (Bitbol, 1998b, p. 274). É então justamente no *uso* do formalismo, ou seja, nas finalidades pragmáticas que orientam a dinâmica desse processo de co-constituição que temos que procurar as raízes da eficácia do procedimento por inteiro, que inclui o recorte da experiência em uma determinada rede de fatos, a organização dessa rede em termos de observáveis e sistemas e, finalmente, a elaboração de um esquema preditivo apropriado. O desafio para a abordagem pragmático-transcendental é, portanto, o de mostrar explicitamente que as estruturas básicas do formalismo quântico podem efetivamente ser derivadas das condições pragmáticas que asseguram a objetividade das práticas que lhe estão associadas (von Weizsäcker, 1980; Bitbol, 1996; 1998b).

Como vimos na seção anterior, essas cláusulas, verdadeiras condições de possibilidade da física²¹, tomam geralmente a forma de princípios de invariância no que diz respeito a certas classes de operações; estes princípios originam, por sua vez, grupos de simetria que exercem fortes vínculos sobre a estrutura do formalismo preditivo. Como exemplo concreto podemos considerar um modelo simples, mas fundamental para as abordagens operacionalistas (Brukner & Zeilinger, 2004): aquele do spin $1/2$. Por constituir o paradigma de todo sistema quântico de dois níveis, este modelo representa a unidade elementar de informação quântica (o chamado *qubit*), desempenhando, por conseguinte, um papel central na redução da estrutura lógica da atividade experimental a um conjunto de alternativas binárias (von Weizsäcker, 1979, p. 148-50; 1980, p. 178-80). Pelo modelo de spin $1/2$, parece concreta a possibilidade de derivar dos vínculos de simetria e continuidade a completa estrutura do espaço abstrato onde se representam observáveis e preparações experimentais (Hughes, 1989, cap. 4; Summhammer, 2000, 2001; Brukner & Zeilinger, 2004). Em particular, emerge desses vínculos a relação de incompatibilidade entre diferentes componentes vetoriais

²¹ E. Wigner (1979, p. 29) trata-as de “pré-requisitos para que seja possível descobrir [...] correlações entre eventos” (*apud* Bitbol, 1998b, p. 267).

do spin. Como já vimos, a existência de observáveis incompatíveis é o que atrapalha a leitura da teoria quântica como simples descrição das propriedades dos sistemas físicos. Assim, significativamente, as próprias condições que conferem a um modelo físico seu valor operacional objetivo resultariam, em última análise, incompatíveis com a concepção que vê na objetividade das teorias o reflexo de uma realidade pré-constituída.

4. Papel do Observador

Os vários eixos do problema da medição que temos analisado até aqui convergem nos enigmas suscitados pela posição aparentemente peculiar do observador nos fenômenos quânticos. Esta peculiaridade é geralmente associada à idéia de que a irreduzibilidade do “quantum de ação” determine uma perturbação incontrolável do sistema observado pelo instrumento de medição, tornando impossível considerar os observadores “apenas espectadores passivos”²². Tanto nos argumentos usados por Heisenberg (1927) para ilustrar as relações de incerteza como nos *gedankenexperiments* utilizados no debate entre Einstein e Bohr sobre a completude da teoria (Bohr, 1949; Teller, 1981, p. 204), o indeterminismo e a necessidade de recorrer a descrições “complementares” (ondulatória ou corpuscular) para o comportamento do mesmo sistema em condições de observação diferentes são ilustrados por meio da metáfora de um *choque* entre sistema estudado e aparato experimental²³, uma metáfora que subentende o arquétipo dualista-atomista da percepção (Bitbol, 1996, p. 240-3). A incompatibilidade de certos pares de observáveis, interpretada como impossibilidade de determinar simultaneamente certas propriedades do sistema, aparece, nessa óptica, como uma limitação epistêmica provocada pela necessidade de perturbar o sistema para adquirir informação sobre ele e pela impossibilidade – devida à quantização da ação – de reduzir arbitrariamente a intensidade dessa perturbação.

²² Cf. por exemplo: Landau e Lifshitz (1977, p. 3); Zurek (1991).

²³ Um exemplo “moderno” desse argumento se encontra ainda nas lições de R. Feynman (Feynman, Leighton & Sands, 1965, p. 1.6-1.9).

Os experimentos recentes de *quantum erasing* (Scully, Englert & Walther, 1991) têm mostrado explicitamente a inadequação dessa interpretação. Nesses experimentos, a escolha de pôr em evidência um ou outro dos possíveis “comportamentos complementares” de um sistema pode ser retardada até o momento posterior à sua interação com o aparelho de medição, tornando claro que a observação de um ou outro comportamento não depende da perturbação mecânica introduzida pelo arranjo experimental (Herzog *et al*, 1995). Na interpretação desses experimentos, um esquema baseado na informação revela-se mais apropriado do que a metáfora da perturbação: o que determina o comportamento observado é a informação “em princípio disponível” sobre o sistema. Assim, por exemplo, a circunstância de que as partículas compostas, como átomos e moléculas, quando forem inseridas em um interferômetro a duas fendas, se comportam, em muitos casos, como corpúsculos localizados (e não produzem um padrão de interferência) é interpretada como uma consequência do fato de que estas partículas, sendo dotadas de graus de liberdade internos mal isolados, ao atravessar o interferômetro disseminam no ambiente informação relativa à *posição* delas (sob forma, por exemplo, de fótons emitidos). Entretanto, se a informação disseminada é pouca e se os graus de liberdade do ambiente onde ela fica armazenada podem ser manipulados, é possível “cancelar” a informação que localiza as partículas e evidenciar comportamentos ondulatórios *também* para corpos “mesoscópicos” dotados de uma estrutura interna complexa²⁴.

De fato, se se pretende analisar o processo de medição em termos físicos, é necessário definir e incluir no modelo empregado os graus de liberdade do aparelho de medição que interagem diretamente com o sistema estudado e que desempenham o papel de ambiente. Um único estado emaranhado é então associado ao conjunto “sistema + (graus de liberdade relevantes do) aparelho de medição”, e as distribuições estatísticas associadas, por exemplo, a comporta-

²⁴ Para esse fim é necessário manipular diretamente as correlações entre partículas e ambiente. Como com a observação da descoerência, as condições experimentais que permitem este tipo de manipulação são bastante críticas (cf. por exemplo Haroche, Brune & Raimond, 1997).

mentos corpusculares e ondulatórios do sistema representam somente dois casos particulares do espectro de distribuições marginais geradas por esse estado global (Bertet *et al*, 2001). No quadro de uma concepção preditiva do formalismo, aliás, as próprias relações de incerteza (que expressam matematicamente a necessidade de recorrer a descrições complementares) não apresentam em si nenhum problema de interpretação particular: elas se referem à estrutura dos possíveis resultados de medições contextualizadas, e não às propriedades efetivamente possuídas por um sistema. Mais do que pela exigência de dar conta *a posteriori* das interações incontrolláveis entre agente de medição e sistema medido, as relações de incerteza decorrem (de uma maneira certamente não trivial) dos vínculos de ordem pragmática que determinam *a priori* as relações entre observáveis num dado modelo.

De fato, embora a imagem mecanicista da impossibilidade de traçar “qualquer separação nítida entre o comportamento independente dos objetos atômicos e sua interação com os instrumentos de medição” (Bohr, 1949, p. 39) continue a ser evocada esporadicamente, nos escritos de Bohr posteriores à sua resposta ao artigo EPR (Bohr, 1935) o discurso tende a mudar de plano concentrando-se na “inseparabilidade do conhecimento e de nossas possibilidades de investigação” (Bohr, 1963, p.12) e na idéia de que o contexto experimental exerce sua influência “sobre as condições nas quais se baseia a própria definição das quantidades físicas” (Bohr, 1935). A metáfora da “perturbação do fenômeno pela observação” chega a ser explicitamente contraposta à necessidade transcendental de situar as predições da física em um contexto experimental específico: para ser não-ambígua (“objetiva”), a definição de um fenômeno tem de fato que “se referir só a observações obtidas em circunstâncias cuja descrição inclui um relato completo do arranjo experimental” (Bohr, 1958, p. 73). A viga mestra do argumento bohriano é, aliás, a observação de que esta condição necessária é também *suficiente* para garantir a objetividade da física: nesse sentido, os pressupostos realistas do argumento EPR, bem como aqueles da metáfora da perturbação, aparecem inutilmente restritivos e motivados só por uma posição epistemológica conservadora.

Mas, ao invés de desenvolver ulteriormente estas reflexões, às quais não são alheias certas influências da tradição kantiana e pragmatista (Murdoch, 1987, p. 225-35), o debate sobre o papel do observador nos fenômenos atômicos restou encaixado no esquema pré-crítico da teoria do conhecimento, oscilando entre uma leitura ontológica e uma leitura epistêmica do indeterminismo quântico. Na formulação canônica da teoria, a idéia de que “[...] a medição provoca o salto do sistema num auto-estado da variável dinâmica que está sendo medida” (Dirac, 1958, p. 36), axiomatizada pelo postulado de projeção, traz para o plano formal a metáfora da “perturbação incontável”, apontando a impossibilidade de determinar, em geral, um estado quântico desconhecido “sem o perturbar”²⁵. Nas próprias propostas avançadas para lidar com as implicações problemáticas do postulado de projeção se reconhece facilmente a herança da contraposição originária entre interpretação “subjetivista” (inicialmente sugerida por M. Born) e interpretação “objetivista” (sustentada por L. De Broglie) da “redução do pacote de ondas”²⁶. A influência da imagem arquetípica de um observador “posto na frente” dos sistemas observados é visível tanto na abordagem mentalista de E. Wigner (1961), que interpreta a redução do estado como um processo físico real associado com uma operação extra-física da consciência, como nas abordagens inspiradas pelo trabalho de Everett (1957), onde o “colapso” é visto como um efeito aparente, que existe só nas experiências “gravadas” pelos observadores-memórias. No primeiro caso, a ação da consciência sobre o estado dos sistemas observados é explicitamente modelada no recíproco esquema atomista da afecção dos órgãos dos sentidos pelos objetos. No segundo, a contextualidade é traduzida numa forma de relatividade ao *ponto de vista* do observador num espaço abstrato, em analogia com o redução galileana das propriedades cinemáticas dos sistemas a quantidades relativas a um sistema de referência particular no espaço real: o “ponto de vista” do observador é representado por um vetor de estado e

²⁵ Cf. por exemplo Zurek (1998).

²⁶ Cf. Bitbol (1996, p. 209-20).

associado com uma nova forma de indexicalidade que indica seu “mundo” de pertencimento (Butterfield, 1995, *apud* Barrett, 1999, p. 213²⁷).

Nessas proposições, a vontade de eliminar toda componente subjetiva eventualmente implicada pela teoria quântica leva quer “à hipóstase metafísica do ponto de vista em primeira pessoa e à projeção da entidade hipostasiada no mesmo plano descritivo do que os relatos em terceira pessoa” (Bitbol, 2000a, p. 109), quer à redução dos “pontos de vista em primeira pessoa [...] a simples localizações num espaço público”, e à correlativa transfiguração da “singularidade de uma experiência numa simples particularidade” representada por um *ponto* nesse espaço (*ibidem*, p. 109; 65). Mas estas tentativas de ancorar a objetividade do conhecimento em uma representação objetivada do próprio processo cognitivo chocam-se com as condições de invariância que asseguram a objetividade *operacional* da física. Assim, a redução mentalista do vetor de estado parece dificilmente conciliável com os requisitos de invariância relativista que garantem a independência das predições de toda determinação espaço-temporal *absoluta*. Por outro lado, no campo everettiano, o problema de determinar a base “preferida” na qual deveria ser decomposto o vetor de estado universal para representar conjuntos de fatos *atuais* (Butterfield, 2001, p. 15), ou aquele de estabelecer *qual é*, entre os conjuntos paralelos de fatos, aquele “do qual nós fazemos parte” (*ibidem*, p. 13), encarna perfeitamente as dificuldades encontradas por uma interpretação descritivista radical para levar em conta adequadamente as simetrias do espaço dos vetores de estado. Estas simetrias não são, aliás, contingentes: elas são constitutivas de uma estrutura geométrica apta a representar predições referidas a resultados definidos relativamente a um contexto experimental específico, e não a “eventos que ocorrem no absoluto” (Bitbol, 1996, p. 139, 154).

A tensão engendrada pela pretensão de fazer convergir “num único plano descritivo-discursivo [...] o compromisso [do sujeito] a respeito *do que aconteceu* e [...] as manipulações [pelo sujeito] de símbolos que oferecem elementos de orientação a respeito *daquilo que provavelmente vai acontecer*” (Bitbol, 2000a, p. 71)

²⁷ Ver também Butterfield (2001, p. 14, 23-4) e as referências bibliográficas contidas nesse artigo.

emerge com clareza nas duas opções metafísicas mais extremas que têm sido associadas respectivamente à abordagem mentalista e à abordagem verettiana. Na primeira, o dualismo mente-matéria (Wigner, 1961) introduz uma fratura explícita entre esfera mental e física; na segunda, a existência de uma infinidade de mundos paralelos (DeWitt & Graham, 1973) introduz uma fratura implícita entre uma realidade “múltipla” e nossa experiência subjetiva “unitária” da atualidade. O problema da medição se transfigura, assim, em um conjunto de problemas de filosofia da mente ligados à recomposição dessas fraturas (Stapp, 1993; Lockwood, 1996): a articulação da consciência com um suporte neurofisiológico, a relação entre vetores de estado e estados mentais²⁸, o desdobramento e a persistência da identidade²⁹. Como Bitbol argumenta em uma ampla e detalhada análise (Bitbol, 2000a), nos pressupostos epistemológicos dos dois grupos de problemas – aqueles ligados à consciência e aqueles ligados à medição – é surpreendentemente possível retrair uma raiz comum: ambos conduzem a aporias do mesmo tipo, determinadas pela confusão de “duas séries discursivas paralelas, das quais uma exprime o fato do “ser-em-situação” (*être-en-situation*) e a outra, um projeto de liberação tão completo quanto possível da particularidade das situações” (*ibidem*, p. 284). Partindo da identificação dessa raiz comum, Bitbol propõe duas estratégias de saída paralelas.

Por um lado, reconhecendo que os conceitos de ‘mente’ e ‘consciência’ “foram introduzidos como projeções reificadas de uma situação expressa em primeira pessoa” e que a atribuição de determinações a essas entidades “substitui-se [...] à indexação dos juízos por determinadas situações individuais espaciais, temporais, biográficas, neurofisiológicas, etc.”, é necessário retornar àquilo que ele chama de “fundamento indexical do discurso mentalista” (*ibidem*, p. 324; 290; 325).

²⁸ A. Shimony (1963, p. 760) avança como possível exemplo de superposição de estados mentais a “indistinção das percepções visuais enquanto se está concentrado na música”.

²⁹ Cf. Barrett (1999); Butterfield (2000).

Por outro lado, o “ser-em-situação” – “subentendido pelas ciências da natureza precisamente na hora em que visam superá-lo pela definição de invariantes” – pode ser adequadamente levado em conta admitindo que, na descrição científica, o que pode ser desindexado é somente “o retículo coordenado [...] dos julgamentos indexados possíveis”³⁰, e que a completude dessa descrição se mede na capacidade de estabelecer uma “rede relacional entre situações acessíveis, situação atual e enunciados libertos das situações, mais do que [naquela de coordenar] esses últimos considerados isoladamente” (*ibidem*, p. 330; 326; 341).

Se a recusa explícita dessa estratégia é o que motiva as abordagens de Everett e Wigner, a natureza *transcendental* da função do observador é dificilmente reconhecida e aceita também pelos supostos herdeiros da escola de Copenhague. Esta reticência se expressa em duas leituras opostas (e caricaturais) do argumento transcendental bohriano³¹, o qual, apesar de seus limites e ambigüidades (Bitbol, 1996, p. 263-9), tem constituído o primeiro passo decisivo na direção indicada pelas citações precedentes de Bitbol. A primeira leitura confunde a posição de Bohr com algumas instâncias idealistas ou mentalistas³²; a segunda leitura a traduz, ao invés, numa hipótese *física* (não justificada, mas em princípio justificável) sobre o comportamento dos sistemas macroscópicos³³.

³⁰ Já insistimos nas seções precedentes sobre as diversas formas de indexação dos enunciados experimentais. Bitbol as resume nos termos seguintes: “indexação por nossa situação geral no universo performativo e perceptivo do gênero humano, no que diz respeito ao recorte do que ocorre em conjuntos ordenados de valores de variáveis, e indexação pelas situações experimentais particulares nas quais podemos estar implicados quanto à designação de um valor particular como *resultado de medição*” (Bitbol, 2000a, p. 290).

³¹ Cf. nota 15 e seção precedente.

³² Uma tal leitura se encontra por exemplo em von Weizsäcker, no início dos anos 40 (Pessoa Jr., 1992, p. 185). Ela é comum entre os adversários da interpretação de Copenhague (cf. por exemplo a interpretação de K. Popper em Howard, 2004). Para uma análise interessante da posição de Wigner no que diz respeito à “ortodoxia” de Copenhague, ver Freire Jr. (2004).

³³ Na leitura de C. Rovelli (1996), por exemplo, a posição de Bohr se traduziria na afirmação de que “o mundo clássico é fisicamente distinto dos sistemas microscópicos

É esta segunda leitura que pode ser percebida, por exemplo, por trás do programa que nos anos 60, em um contexto influenciado pela polêmica materialista (Graham, 1966; Landau & Lifschitz, 1977, cap. 1) contra o “subjetivismo” de Wigner (Freire Jr., 2004), visava mostrar a universalidade e a autoconsistência da mecânica quântica (Jammer, 1974, p. 492-3; Murdoch, 1987, p. 114-8) explorando o tratamento estatístico dos instrumentos de medição *modelizados como sistemas quânticos* com um número macroscópico de graus de liberdade (Daneri, Loinger & Prosperi, 1962; Rosenfeld, 1965).

Uma perspectiva de naturalização dos processos cognitivos ainda mais radical, que envolve o próprio observador, é aquela adotada hoje pelas abordagens que vêem no vetor de estado a expressão não do estado físico de um sistema, mas sim da *informação* disponível sobre ele (Rovelli, 1996; Fuchs & Peres, 2000). Estas abordagens, em consonância com certas afirmações de Heisenberg (cf. Bitbol, 2003, p. 160), interpretam a contextualidade das previsões quânticas como um reflexo da natureza intrinsecamente relacional da descrição física: “a descrição quanto-mecânica de um sistema não [é] uma descrição ‘absoluta’ da realidade, mas, sim, uma [...] codificação das propriedades de um sistema *relativamente* a um dado observador” (Rovelli, 1996, p. 1648). A consistência dessa interpretação se apóia sobre o duplo estatuto implicitamente atribuído ao observador: por um lado, o observador é o intérprete do formalismo, capaz de ler a informação codificada nos vetores de estado e de situá-la na rede factual-operacional à qual os símbolos fazem referência; por outro lado, enquanto sistema físico, o observador pode ele mesmo ser representado por um vetor de estado que reflete (aos olhos de um outro observador) a eventual informação adquirida por ele ao longo de um processo de medição³⁴. A própria derivação da estrutura

descritos pela mecânica quântica”, o que implicaria a necessidade de “tratar uma porção do mundo de uma forma diferente do restante”.

³⁴ Utilizando uma terminologia introduzida por Bitbol (2003), poderia se afirmar que, em Rovelli, o observador fica projetado no plano das relações “laterais-objetais” entre sistemas físicos, sem todavia perder os privilégios que lhe derivam de sua posição de *sujeito* envolvido em uma rede de relações “transversais-cognitivas” com os sistemas físicos.

do formalismo a partir dos vínculos de ordem transcendental que permitem o tratamento eficaz da informação por um experimentador “em situação”, se transfigura, nas abordagens informacionais, na busca de postulados *físicos* que regulem a troca de informação (ou seja, o estabelecimento de correlações) entre sistemas e observadores naturalizados.

Uma ambigüidade desse tipo pode ser percebida até na reformulação informacional do programa de von Weizsäcker proposta por H. Lyre. “Todo sujeito – nota Lyre – pode em princípio ser descrito pela teoria quântica – mas isso, naturalmente, como objeto para e por um outro sujeito. Isto é o ponto-chave do argumento: os sujeitos podem ser descritos como objetos, mas não todos ao mesmo tempo! A física sem algum sujeito seria sem significado. Nesse sentido, o sujeito é irreduzível.” (Lyre, 1999, p. 148). O fato de sublinhar a necessidade de “deixar fora da descrição” pelo menos *um* sujeito parece ceder mais uma vez à tentativa de projetar em uma metáfora extensional a distinção *funcional* – enfatizada pelo próprio von Weizsäcker (1979, p. 128) – entre *o* sujeito (transcendental) *pressuposto* pela teoria e *todo* sujeito (empírico) representável *na* teoria.

O simples fato de formular a teoria quântica em termos informacionais não elimina nenhuma das suas dificuldades conceituais³⁵. Como o sublinhava J. S. Bell (1990), a informação é necessariamente informação “sobre alguma coisa” e “para alguém”. Se a informação é relativa a “propriedades existentes”, e é ela mesma exprimível em termos das características físicas de um sistema-memória, as abordagens informacionais coincidem de fato com as abordagens everettianas. Se, ao invés, a informação é relativa aos possíveis resultados que podem ser obtidos por um observador potencial em um contexto de medição especificado, estamos então em uma perspectiva pragmática, certamente mais próxima da posição de Bohr. Mas nesse caso, a representação por um vetor de estado dos instrumentos de medição ou dos observadores *enquanto tais* parece completamente supérflua (cf. Bohr, 1939, p. 47-8; Teller, 1981, p. 201): o comportamento do aparelho *M enquanto aparelho* é integralmente determinado pelo vetor de estado

³⁵ Para uma análise das ambigüidades e dos limites da concepção epistêmica do vetor de estado veja-se também Mohrhoff (2001b).

do sistema medido S , já que os valores dos observáveis aos quais este vetor associa uma probabilidade não têm outro sentido operacional do que o de indicar o comportamento esperado para um aparelho de medição. Obviamente, é perfeitamente legítimo construir um modelo quântico de “aparelho” e considerar as possíveis manipulações experimentais efetuadas *sobre* o sistema-aparelho M em um contexto bem definido. A construção desse modelo, e em particular a definição operacional dos observáveis relativos a M , intervém, contudo, inevitavelmente *a posteriori*, sendo vinculada pela exigência de reproduzir as correlações estritas com os observáveis de S que autorizam tratar M como “aparelho de medição de S ”. Em outras palavras, a consistência dessa construção artificial apóia-se numa interpretação pragmática do formalismo bem corroborada, e certamente não o contrário. Como já vimos no caso geral dos sistemas macroscópicos, a idéia de que certas relações entre símbolos possam oferecer algum tipo de fundamento ao processo pragmático pelo qual se constroem e se organizam fatos e esquemas teóricos é ilusória.

Numa perspectiva pragmático-transcendental, a simples constatação de teor wittgensteiniano de que o sujeito é *implicado* no simbolismo substitui-se ao dilema de estabelecer se a função do observador pode ser representada nos termos da teoria ou se ela tem que ser delegada a uma entidade mental extra-teórica. De fato, enquanto esquema apto a prever as correlações entre certas seqüências de operações, o simbolismo comporta necessariamente a definição de perguntas e de um contexto experimental para poder ser *usado*. Esta definição, que pressupõe uma prática experimental-comunicacional consolidada e uma rede de fatos organizados de acordo com um quadro conceitual compartilhado, contém tudo o que há de “intervenção” do observador na medição quântica.

5. Conclusões

Mudar claramente o foco do plano da representação para o da práxis, e identificar a raiz da unidade da física naquelas mesmas condições que a tornam possível enquanto *prática* (e não descrição) objetiva, permite não somente a dissolução dos vários aspectos do problema da medição, mas também, e mais em

geral, uma revisão radical do esquema explicativo realista da eficácia e da racionalidade da física. Esta revisão, e a correlativa proposta de um esquema completamente diferente, são o elemento programático que mais diferencia a abordagem pragmático-transcendental das expressões tradicionais do instrumentalismo. À guisa de conclusão, vamos então generalizar nossa reflexão sobre a objetividade e a universalidade da mecânica quântica e ver como a crítica da noção de realidade pré-estruturada permite superar o horizonte representacionista e esboçar uma proposta alternativa para dar conta da adequação empírica e da unidade “convergente” das teorias.

O nexos aparentemente incindível entre a objetividade da física e a “existência de um mundo externo” constitui o mais clássico dos bastiões defensivos da doutrina realista. Em 1931, enquanto a revolução conceitual desencadeada pelo trabalho de M. Planck sobre a radiação eletromagnética ia se consolidando nos cânones de uma ortodoxia em tonalidades positivistas, o próprio Planck não se cansava, por exemplo, de afirmar a necessidade de alargar “o fundamento que o positivismo oferece à física [...] por uma adição, cuja significação consiste no fato de que, por quanto for possível, a ciência é liberada das contingências que são introduzidas pela referência a indivíduos humanos específicos”. “E isto é feito – continuava Planck – por meio de um passo fundamental no metafísico [...]; isto é, por meio da hipótese de que nossas experiências [...] nos dão informação sobre um outro mundo que está atrás delas e é independente de nós, em outras palavras, a hipótese de que um mundo externo real existe” (Planck, 1931, *apud* Howard, 1994, p. 205). Em outros termos, o mundo externo fornece aquele ponto fixo sobre o qual se apóia a reprodutibilidade dos experimentos, precondição para uma síntese teórica preditivamente eficaz da atividade experimental. Na ausência de um esquema alternativo capaz de conceber a eficácia preditiva de outra forma que como simples faculdade mimética, a “hipótese metafísica da existência de um mundo externo” passa a funcionar como uma verdadeira condição de possibilidade do poder heurístico das teorias; e a constatação empírica desse poder transforma-se em convalidação *a posteriori* do esquema cognitivo representacionista (cf. Dieks, 1988, p. 175).

Se as implicações epistemológicas da revolução quântica têm sido percebidas como tão radicais, isto é devido ao fato de que ela nos tem obrigado a colocar em discussão este esquema pela via mais direta e inesperada: mostrando as falhas de sua consistência interna. A mecânica quântica tem encarnado historicamente não somente a possibilidade de desenvolver uma estrutura preditiva eficaz independentemente de toda coerência descritiva, mas também aquela mais surpreendente de que tal estrutura resulte, *a posteriori*, incompatível com qualquer modelo do mundo baseado em entidades que interagem localmente. O advento da física quântica tem assim determinado as condições intelectuais para fazer emergir com clareza a própria fragilidade filosófica do “dogma de que só onde há correspondência à realidade há possibilidade de acordo racional” (Rorty, 1979, p. 333).

A análise pós-popperiana da atividade científica tem mostrado que a organização da prática de laboratório em termos de fatos atestáveis e comunicáveis e de seqüências de operações codificadas desenrola-se – pelo menos nos períodos revolucionários – *em paralelo* com a construção do formalismo preditivo, através de um mútuo *feedback* determinado pelo vínculo pragmático que os fatos se deixem reproduzir na prática de uma forma antecipável pela teoria (ver, por exemplo, o estudo de A. Pickering (1984) sobre “a construção dos quarks”). Naturalmente, isto não exclui necessariamente que a dialética construtiva entre teoria e fatos seja, em última análise, determinada pelos vínculos impostos pelo “mundo externo”, e de fato o pragmatismo construtivista tem sido conjugado com várias formas de realismo. Analogamente, o fato de reconhecer, como o propõe P. Janich, que “uma teoria física não é de jeito nenhum um sistema de proposições assertivas sobre o mundo [...], mas, sim, um sistema de instruções (disfarçado por razões históricas na forma de proposições assertivas) para o engenheiro ou [...] para o físico de laboratório” (Janich, 1996, p. 124), não exclui que estas instruções sejam determinadas pela exigência de manipular eficazmente entidades *reais*. De fato, o instrumentalismo tradicional se caracteriza mais pela atitude cética no que diz respeito às possibilidades *explicativas* do realismo científico do que por uma crítica dos limites intrínsecos do esquema

epistemológico representacionista: este esquema é de fato o horizonte comum das duas doutrinas.

Ao contrário, é precisamente a recusa radical do esquema epistemológico representacionista (Bitbol, 2000a, p. 108-10) que constitui a base para desenvolver uma abordagem instrumentalista *construtiva*. Partindo do pressuposto de que “efetuar experimentos é inscrever-se numa prática, agir de maneira coordenada conforme as normas de uma racionalidade procedimental” (Bitbol, 1996, p. 258), a abordagem pragmático-transcendental visa mostrar “que o sucesso preditivo de algumas de nossas teorias científicas mais gerais pode ser atribuído, em grande parte, à circunstância em que elas formalizam os requisitos mínimos de toda predição das ocorrências de nossa atividade, gestual ou experimental que seja.” (Bitbol, 1998b, p. 271). Nessa perspectiva, “a própria estrutura [das] teorias é vista incorporar a estrutura performativa da experimentação” mais do que refletir “a espinha dorsal da natureza” (*ibidem*). O próprio argumento da “inferência para a melhor explicação, que é o argumento mais poderoso dos realistas científicos, aparece muito mais fraco, uma vez que a escolha não é mais entre a explicação realista da eficiência das teorias e nenhuma explicação” (*ibidem*).

Considerações análogas podem ser desenvolvidas a propósito da unidade da física. A mecânica quântica tem mostrado concretamente que a exigência de desenvolver uma imagem unitária, coerente e omnicomprensiva do mundo passa em segundo plano frente às possibilidades abertas pela manipulação eficaz e organicamente previsível dos sistemas físicos. Entretanto, reconhecer que a natureza radicalmente operacional, “alegre e improvisadora” – segundo uma definição de Merleau-Ponty – da ciência prevalece sobre “um ideal de completude [...] que se focaliza integralmente no plano discursivo e formal” (Bitbol, 2000a, p. 338) não leva necessariamente a um pragmatismo “regional” ou “fenomenológico”. No caso dos dualismos ligados ao problema da medição, temos visto, pelo contrário, que, subtraindo o problema à sua formulação representacionista, é possível cumprir perfeitamente os *desiderata* unitários relativos à dinâmica da teoria e a seu domínio de aplicabilidade. De fato, a abordagem pragmático-transcendental – no rastro do racionalismo kantiano – leva a uma visão da física singularmente

orgânica. Enquanto prática de pesquisa baseada em um corpus procedimental altamente padronizado, a física, quer se trate de observações astronômicas ou de experimentos no domínio subatômico, se constitui a partir de condições de possibilidade extremamente gerais. Por isso seu projeto se reveste, *a priori*, de um forte potencial unitário. Uma unidade sistemática que não surge, portanto, da natureza comum dos objetos manipulados (putativamente compostos dos mesmos “constituintes elementares”), mas decorre, ao invés, da generalidade e homogeneidade das próprias formas da manipulação. “A universalidade [das leis físicas], que a partir da tradição do empirismo lógico tem sido interpretada como quantificação universal no âmbito de todos os potenciais objetos naturais, consiste, em verdade, no fato de que se trata de regras *para a ação*” (Janich, 1996, p. 126, grifo meu). Nesse sentido, na dinâmica histórica das teorias é possível falar, segundo Bitbol, de “convergência reflexiva” para com “as formas mais universais da obra de orientação do ser no mundo” (Bitbol, 1998a, p. 72). Um dos mitos sustentadores da epopéia científica cantada pelos realistas, aquele da convergência das teorias para com o real, não seria então nada mais que a “projeção ontológica ou a imagem no espelho” da convergência reflexiva (*ibidem*).

Por um lado, deslocar a atenção, na análise dos procedimentos de objetivação, do plano das formas cognitivas da sensibilidade e do intelecto para aquele das formas pragmáticas da experimentação e da comunicação implica certamente uma revisão profunda e uma limitação drástica do programa originário da filosofia transcendental (cf. Bitbol, 2000b, p. 84). Por outro lado, todavia, isso permite alcançar resultados que, no horizonte newtoniano do pensamento de Kant, eram dificilmente concebíveis. Em um quadro pragmático, a unidade da física tem de fato raízes que vão muito além do princípio regulador kantiano. As teorias quânticas de campo parecem sugerir a perspectiva de uma justificação *a priori* daquelas mesmas leis empíricas que na *Crítica da razão pura* e nos *Princípios metafísicos da ciência da natureza* pareciam a Kant irredutíveis. “O programa que Kant formulou para a física clássica se mostrará quer ser irrealizável quer ter sido realizado no momento em que determinadas asserções auto-evidentes sobre as precondições de possibilidade da experiência tenham levado precisamente àquela

física unificada que o desenvolvimento contemporâneo tão obviamente visa” (von Weizsäcker, 1980, p.155). A chave dessa justificação se encontra, como já dissemos, nos princípios de simetria: no fato, isto é, de eles refletirem a invariância da prática experimental sob certas classes de transformações, uma invariância à qual a própria prática deve o seu caráter objetivo, e que constitui, nesse sentido, uma de suas condições de possibilidade.

Recusando toda ambição reducionista própria do operacionalismo positivista, mas acolhendo as lições epistemológicas do pragmatismo e do construtivismo³⁶, a abordagem pragmático-transcendental reconhece à ação um papel central no conhecimento físico: um conhecimento de “como fazer” mais de que de “como é o mundo”³⁷. Numa perspectiva onde os traços racionais da física se desenham autonomamente de todo vínculo ontológico, a tarefa da filosofia crítica parece muito menos a de identificar as estruturas ontológicas putativas por trás das teorias do que aquela de se interrogar sobre a relação direta entre as finalidades pragmáticas da física, as condições que tornam possível o cumprimento dessas finalidades e a própria estrutura das teorias. Por trás da descoberta de que a eficácia e a racionalidade da física são determinadas pelos *limites constitutivos* de uma *prática* – limites que, por sua vez, respondem aos fins e interesses que esta prática persegue –, deixa-se entrever uma oportunidade duplamente terapêutica: aquela de dissolver os enigmas relativos aos “fundamentos” da física, liberando o conhecimento científico da tarefa imprópria (e improba) de *representar* o mundo, e o mundo da perspectiva redutiva de se exaurir nessa representação.³⁸

³⁶ Além dos autores já citados, como P. Janich e A. Pickering, que pertencem a duas correntes diferentes do movimento construtivista, vale a pena recordar nesse contexto o trabalho de J. Piaget (cf. Bitbol, 2001).

³⁷ Cf. Bitbol (2000a, p. 270-1).

³⁸ Agradeço Olival Freire Jr. e Patricia Kauark-Leite pela ajuda, os conselhos preciosos e as numerosas correções, e Jane Lemos pela primeira revisão lingüística. Naturalmente, a responsabilidade dos erros e imprecisões que ainda aparecem no texto cabe unicamente a mim. Este trabalho foi realizado graças ao suporte do CNPq (bolsa DCR).

Abstract: Following the lead of M. Bitbol’s work, the article investigates the main aspects of the quantum measurement problem through a perspective inspired in transcendental philosophy and linguistic pragmatism of a Wittgensteinian slant. The aim is to show how the very formulation of the problem presupposes a pre-critical epistemological scheme, that is, a scheme that associates the objectivity of scientific knowledge to its capacity to adequately describe a pre-structured reality. Typical of that scheme is a representationalist conception of theories, shared by realist and traditional instrumentalist approaches alike. The dissolution of the paradoxical aspects of the measurement problem is achieved by making explicit the pragmatic and operational roots of objectivity – roots that are intrinsically linked to the predictive aim of physics and that exert over the physical models strong constitutive constraints. This analysis opens up a window to a wider discussion on the rationality of physics, the mathematical structure of theories and their historical dynamics.

Key-words: Quantum physics. Measurement problem. Objectivity. Transcendental philosophy. Pragmatism. Representationalism.

Referências Bibliográficas

- BACCIAGALUPPI, G. “The Role of Decoherence in Quantum Mechanics”. In: E. N. ZALTA (org.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2005. Versão eletrônica: <http://plato.stanford.edu/archives/sum2005/entries/qm-decoherence/>.
- BARRETT, J. *The quantum mechanics of minds and worlds*. Oxford, Oxford University Press, 1999.
- BELL, J. S. “On Einstein-Podolsky-Rosen paradox”. *Physics*, 1, 1964, p. 195-200. (Reimpresso in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 403-8.).
- _____. “Against ‘Measurement’”. *Physics World*, 8, 1990, p. 33-40.
- BERTET, P., OSNAGHI, S., RAUSCHENBEUTEL, A., NOGUES, G., AUFFEVES, A., BRUNE, M., RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. “A complementarity experiment with an interferometer at the quantum-classical border”. *Nature*, 411, 2001, p. 166-70.

BITBOL, M. *Mécanique quantique, une introduction philosophique*. Paris, Champs Flammarion, 1996.

_____. *L'aveuglante proximité du réel, anti-réalisme & quasi-réalisme en physique*. Paris, Flammarion, 1998a.

_____. "Some steps towards a transcendental deduction of quantum mechanics". *Philosophia naturalis*, 35, 1998b, p. 253-80.

_____. *Physique et philosophie de l'esprit*. Paris, Flammarion, 2000a. (Edição portuguesa : *Física e filosofia do espírito*. Trad. de A. Rabaça. Lisboa, Piaget, 2001. As citações se referem à edição original francesa).

_____. "Arguments transcendants en physique moderne". In: CHAUVIER, S. & CAPELLÈRES, F. (orgs.). *La querelle des arguments transcendants*. *Revue philosophique universitaire de Caen*, 35, 2000b, p. 81-101.

_____. "Non-representationalist theories of knowledge and quantum mechanics". *Nordic Journal of Philosophy*, 2, 2001, p. 37-61.

_____. "Relations et corrélations en physique quantique". In: CROZON, M. & SACQUIN, Y. (orgs.). *Un siècle de quanta*. Les Ulis, EDP Science, 2003, p. 159-81.

BOHM, D. *Causality and Chance in Modern Physics*. Londres, Routledge & Kegan Paul, 1957.

BOHR, N. "Quantum mechanics and physical reality". *Nature*, 121, 1935, p. 65.

_____. "Le problème causal en physique atomique". In: *Les nouvelles théories de la physique*. Paris, Institut International de la Coopération Intellectuelle, 1939, p. 11-48. (Traduzido para o inglês in: *Collected works 7: Foundation of physics II (1933-1958)*. Org. por J. Kalckar. Amsterdam, North-Holland/Elsevier, 1996.).

_____. "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics". In: SCHILLP, P. A. (org.). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*.

Evanston, The Library of Living Philosophers, 1949. (Reimpresso in: *Atomic Physics and Human Knowledge*. Nova Iorque, Wiley, 1958, p. 32-66. As citações se referem a esta edição).

_____. *Atomic Physics and Human Knowledge*. Nova Iorque, Wiley, 1958.

_____. *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. Bungay, Richard Clay, 1963.

BRUKNER, È. & ZEILINGER, A. “Information and fundamental elements of the structure of quantum theory”. In: CASTELL, L. & ISCHEBECK, O. (orgs.). *Time, quantum and information*. Berlim, Springer-Verlag, 2003, p. 323-55.

BUB, J. “From micro to macro: A solution to the measurement problem of quantum mechanics”. In: FINE, A. & JARRETT, L. (orgs.). *PSA 1988: Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. Vol. II. East Lansing, Philosophy of Science Foundation, Michigan State University, 1989, p. 134-44.

BUTTERFIELD, J. “Worlds, minds and quanta”. Comunicação apresentada na *Aristotelian Society and Mind Association Joint Session*. Liverpool, 1995.

_____. “Some worlds of quantum theory”. In: RUSSEL, R. J., CLAYTON, P., WEGTER-MCNELLY, K. & POLKINGHORNE, J. (orgs.). *Quantum mechanics, scientific perspectives on divine action*. Notre Dame (Indiana), University of Notre Dame Press, 2001, p. 111-40.

CHEVALLEY, C. “Objectivité et intersubjectivité chez Bohr”. *Épistémologiques*, I(1-2), 2000, p. 307-24.

DANERI, A., LOINGER, A. & PROSPERI, G. M. “Quantum theory of measurement and ergodicity conditions”. *Nuclear physics*, 33, 1962, p. 297-319. (Reimpresso in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 657-79.).

Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 3, v. 15, n. 1, p. 79-124, jan.-jun. 2005.

- DEWITT, B. & GRAHAM, N. (orgs.). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton, Princeton University Press, 1973.
- DIEKS, D. "The formalism of quantum theory: An objective description of reality?". *Annalen der Physik*, 7, 1988, p. 174-90.
- _____. "Resolution of the measurement problem through decoherence of the quantum state". *Physics Letters A*, 142, 1989, p. 439-46.
- DIRAC, P. A. M. *The principles of quantum mechanics*. 4a ed. Oxford, Clarendon Press, 1958.
- EINSTEIN, A. "Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux". In: ANDRÉ, G. (org.). *Louis de Broglie: physicien et penseur*. Albin Michel, Paris, 1953, p. 4-15.
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N. "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?". *Physical Review*, 47, 1935, p. 777-80.
- ESPAGNAT, B. d'. *Conceptual foundations of quantum mechanics*. 2a ed. Reading, Benjamin, 1976.
- EVERETT III, H. "Relative state formulation of quantum mechanics". *Reviews of Modern Physics*, 29, 1957, p. 454-62. (Reimpresso in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 315-23.).
- FAYE, J. & FOLSE, H. J. *Niels Bohr and contemporary philosophy. Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 135*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B. & SANDS, M. *The Feynman lectures on physics. Vol. 3*. Reading, Addison-Wesley, 1965.

- FREIRE Jr., O. “The historical roots of ‘foundations of quantum physics’ as a field of research (1950 -1970)”. *Foundations of Physics*, 34(11), 2004, p. 1741-60.
- FUCHS, C. A. & PERES, A. “Quantum theory needs no ‘interpretation’”. *Physics Today*, 53(3), 2000, p. 70-1.
- GHIRARDI, G. C., RIMINI, A. & WEBER, T. “Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”. *Physical Review*, D34, 1986, p. 470-91.
- GRAHAM, L. R. “Quantum mechanics and dialectical materialism”. *Slavic Review*, 25, 1966, p. 381-410.
- HABERMAS, J. *Conhecimento e interesse*. Trad. de J. N. Heck. Rio de Janeiro, Zahar, 1982.
- HAROCHE, S., BRUNE, M. & RAIMOND, J. M. “Experiments with single atoms in a cavity: entanglement, Schrödinger's cats and decoherence”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 355, 1997, p. 2367-80.
- HEISENBERG, W. “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”. *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, p. 172-98. (Traduzido para o inglês in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 168-81.).
- HERZOG, T., KWIAT, P. G., WEINFURTER, H. & ZEILINGER, A. “Complementarity and the quantum eraser”. *Physical Review Letters*, 75, 1995, p. 3034-37.
- HOME, D. & WHITAKER, M. A. B. “Ensemble interpretations of quantum mechanics. A modern perspective”. *Physics Reports*, 210(4), 1992, p. 223-317.
- HONNER, J. *The Description of Nature, Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*. Oxford, Clarendon Press, 1987.

- HOWARD, D. "What makes a classical concept classical". In: FAYE, J. & FOLSE, H. J. (orgs.). *Niels Bohr and contemporary philosophy. Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 135*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994, p. 201-29.
- _____. "Who invented the 'Copenhagen Interpretation'? A Study in Mythology". *Philosophy of Science*, 71, 2004, p. 669-2.
- HUGHES, R. I. G. *Quantum mechanics, its structure and interpretation*. Cambridge (MA), Harvard University Press, 1989.
- JAMMER, M. *The philosophy of quantum mechanics*. Nova Iorque, Wiley and Sons, 1974.
- JANICH, P. *I limiti della scienza naturale*. Trad. de M. Buzzoni. Milano, Franco Angeli, 1996.
- JOOS, E. & ZEH, H. D. "The emergence of classical properties through interaction with the environment". *Zeitschrift für Physik B*, 59, p. 223-43, 1985.
- KAUARK-LEITE, P. *Vers une critique de la raison quantique : les approches transcendantales en mécanique quantique*. Tese de doutorado, Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée, École Polytechnique de Paris, 2004. Versão eletrônica:
<http://www.imprimerie.polytechnique.fr/Theses/Files/Kauark.pdf>
- KENT, A. "Against many-world interpretation". *International Journal of Modern Physics*, A5, 1990, p. 1745-62.
- LANDAU, L. D. & LIFSCHITZ, E. M. *Quantum mechanics*. 3a ed. revisada. Trad. de J. B. Sykes & J. S. Bell. Oxford, Pergamon Press, 1977.
- LEGGETT, A. J. "Reflections on the quantum measurement paradox". In: HILEY, B. J. & PEAT, F. D. (orgs.). *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm*. Londres, Routledge & Kegan Paul, 1987.

- LOCKWOOD, M. “‘Many Minds’ interpretations of quantum mechanics”. *British Journal for the Philosophy of Science*, 47, 1996, 159-88.
- LYRE, H. “Against measurement? On the concept of information”. In: BLANCHARD, P. & JADCZYK, A. (orgs.). *Quantum Future: From Volta and Como to Present and Beyond*. Berlin, Springer, 1999, p. 139-49.
- MITTELSTAEDT, P. “The constitution of objects in Kant’s philosophy and in modern physics”. In: PARRINI, P. (org.). *Kant and contemporary epistemology*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994, p. 115-29.
- MERMIN, D. “What’s wrong with these elements of reality?”. *Physics Today*, 43(6), 1990, p. 9-10.
- MOHRHOFF, U. “Two theories of decoherence”. 2001a. Versão eletrônica : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0108002>.
- _____. “Against ‘knowledge’”. 2001b. Versão eletrônica: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0109150>.
- _____. “The world according to quantum mechanics (Or the 18 errors of Henry P. Stapp)”. *Foundations of Physics*, 32(2), 2002, p. 217-54.
- MURDOCH, D. *Niels Bohr’s philosophy of physics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
- NOGUES, G., RAUSCHENBEUTEL, A., OSNAGHI, S., BRUNE, M., RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. “Seeing a single photon without destroying it”. *Nature*, 400, 1999, p. 239-42.
- OMNÈS, R. “Consistent interpretations of quantum mechanics”. *Review of Modern Physics he interpretation of quantum mechanics*, 64(2), 1992, p. 339-82.
- OSNAGHI, S., BERTET, P., AUFFEVES, A., MAIOLI, P., BRUNE, M., RAIMOND, J. M. & HAROCHE, S. “Coherent control of an atom collision in a cavity”. *Physical Review Letters*, 87, 2001, p. 037902-5.

- PARK, J. L. "The self-contradictory foundations of formalistic quantum measurement theories". *International Journal of Theoretical Physics*, 8(3), 1973, p. 211-8.
- PESSOA Jr., O. "O problema da medição em mecânica quântica: um exame atualizado". *Cadernos de Historia e Filosofia da Ciência*, Série 3, 2(2), 1992, p. 177-217.
- PETERSEN, A. *Quantum physics and the philosophical tradition*. Cambridge (MA), M.I.T. Press, 1968.
- PICKERING, A. *Constructing quarks. A sociological history of particle physics*. Chicago, Chicago University Press, 1984.
- PLANCK, M. *Positivismus und reale Aussenwelt*. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1931.
- RORTY, R. *Philosophy and the Mirror of Nature*. University Press, 1979. (Edição portuguesa: *A filosofia e o espelho da natureza*. Trad. de A. Trânsito. Rio de Janeiro, Relume-Dumará, 1994. As citações se referem à edição original americana).
- ROSENFELD, L. "Foundations of quantum theory and complementarity". *Nature*, 190, 1961, p. 384-88.
- _____. "The measuring process in quantum mechanics". *Supplement of the Progress of Theoretical Physics*, número extra, 1965, p. 222-31.
- ROVELLI, C. "Relational Quantum Mechanics". *International Journal of Theoretical Physics*, 35, 1996, p. 1637-78.
- SAUNDERS, S. "Decoherence, relative states and evolutionary adaptation". *Foundations of Physics*, 23, 1993, p. 1553-85.
- SCHRÖDINGER, E. "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik". *Die Naturwissenschaften*, 23, 1935, p. 807-12, 823-8, 844-9. (Traduzido para o inglês in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 152-67.).

- SCULLY, M. O., ENGLERT, B.-G. & WALTHER, H. “Quantum optical tests of complementarity”. *Nature*, 351, 1991, p. 111-16.
- SHIMONY, A. “Role of the observer in quantum theory”. *American Journal of Physics*, 31, 1963, p. 755-77.
- _____. *Search for a Naturalistic Worldview. Vol. 1.* Cambridge, Cambridge University Press, 1993, p. 62-76.
- _____. “Bell's Theorem”. In: ZALTA, E. N. (org.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2005. Versão eletrônica:
<http://plato.stanford.edu/archives/sum2005/entries/bell-theorem>.
- STAPP, H. P. “The Copenhagen interpretation”. *American Journal of Physics*, 40, 1972, p. 1098-116.
- _____. *Mind, Matter and Quantum mechanics.* Berlim, Springer-Verlag, 1993.
- SUMMHAMMER, J. “Invariants of elementary observation”. 2000. Versão eletrônica : <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0008098>.
- _____. “Structure of probabilistic information and quantum laws”. In: KHRENNIKOV, A. (org.). *Foundations of Probability and Physics*. Singapore, World Scientific, 2001, p. 350-63.
- TELLER, P. “The projection postulate and Bohr’s interpretation of quantum mechanics”. In: ASQUITH, P. & GIERE, R. (orgs.). *PSA 1980: Proceedings of the 1980 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association. Vol. II.* East Lansing, Philosophy of Science Foundation, Michigan State University, 1981, p. 201-23.
- VAIDMAN, L. “The many-worlds interpretation of quantum mechanics”. In: ZALTA, E. N. (org.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2002. Versão eletrônica:
<http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds>.

- VAN FRAASSEN, B. C. *Quantum mechanics, an empiricist view*. Oxford, Oxford University Press, 1991.
- _____. *The scientific image*. Oxford, Oxford University Press, 1980.
- VON NEUMANN, J. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Trad. de R. T. Beyer. Princeton, Princeton University Press, 1955.
- VON WEIZSÄCKER, C. F. "The preconditions of experience and the unity of physics". In: BIERI, P., HORSTMANN, R.-P. & KRÜGER, L. (orgs.). *Transcendental arguments and science*. Dordrecht, Reidel, 1979, p.123-58.
- _____. *The Unity of Nature*. Trad. de F. J. Zucker. Nova Iorque, Farrar-Straus-Giroux, 1980.
- WALLACE, D. "Everettian rationality: defending Deutsch's approach to probability in the Everett interpretation". *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 34, 2003, p. 415-38.
- WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983.
- WIGNER, E. "Remarks on the mind-body question". In: GOOD, I. J. (org.). *The scientist speculates*. Londres, Heinemann, 1961, p. 284-302. (Reimpresso in: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (orgs.). *Quantum theory and measurement*. Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 168-81.).
- _____. *Symmetries and Reflexions*. Woodbridge, Ox Bow Press, 1979.
- WITTGENSTEIN, L. *On certainty*. Trad. de D. Paul & G. E. M. Anscombe. Nova Iorque, Harper and Row, 1969. (Edição portuguesa: *Da certeza*. Trad. de M. E. Costa. Rio de Janeiro, Edições 70, 1990.).
- ZUREK, W. H. "Pointer basis of quantum apparatus : into what mixture does the wave packet collapse ?". *Physical Review*, D24, 1981, p. 1187-90.
- _____. "Decoherence and the transition from quantum to classical". *Physics Today*, 44, 1991, p. 36-44.

_____. “Decoherence, einselection and the existential interpretation (the rough guide)”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A356, 1998, p. 1793-820.

_____. “Decoherence, einselection and the quantum origins of the classical”. *Review of Modern Physics*, 75, 2004, p. 715-75.