

O Sujeito na Física Quântica

Oswaldo Pessoa Jr.

Mestrado em Ensino, História e Filosofia das Ciências (UFBa-UEFS)

Depto. de Ciências Humanas e Filosofia – Universidade Estadual de Feira de Santana

Publicado em OLIVEIRA, E.C. (org.),

Epistemologia, Lógica e Filosofia da Linguagem – Ensaios de Filosofia Contemporânea,

ISBN 85-7395-055-2, Núcleo de Estudos Filosóficos – UEFS, Feira de Santana, 2001, pp. 157-96.

1. Apresentação

Este artigo é uma tentativa de esclarecer, para filósofos e amigos da filosofia, a posição do *sujeito epistemológico* dentro da visão de mundo fornecida pela Teoria Quântica. Esta teoria, desenvolvida na década de 1920, fornece a linguagem matemática apropriada para se descrever o comportamento dos átomos e da radiação que interage com os átomos.

Notem que usei o termo *linguagem*. A Teoria Quântica não nos diz muito mais sobre o mundo dos átomos do que o português nos diz sobre o mundo cotidiano. Para que ela passe a fornecer previsões sobre o mundo atômico, é preciso descrever um estado de coisas concreto do mundo.¹ Sem essa descrição mais concreta, válida para cada caso específico, a Teoria Quântica é apenas uma linguagem, ou então – se tal afirmação for muito forte – uma *visão geral de mundo*. Qualquer que seja o caso, esta sua generalidade a torna interessante para a Filosofia!

Qual é então a visão de mundo da Teoria Quântica? Neste momento, poderíamos enunciar uma porção de espantosos fatos gerais: um átomo poderia estar em dois lugares ao mesmo tempo, algo no presente poderia afetar algo no passado, etc. É desta maneira que a Mecânica Quântica é apresentada nos meios de comunicação, o que gera ao mesmo tempo fascínio e frustração: frustração por causa da sensação de que nunca poderemos entender o que está acontecendo. Não quero negar que o *mundo* quântico seja fascinante e misterioso, mas desde já é preciso deixar claro uma característica notável da *teoria* quântica.

A Teoria Quântica é consistente com diferentes *interpretações* da teoria. Ou seja, é possível interpretar o mundo quântico (1) como consistindo apenas de ondas, ou (2) como consistindo simultaneamente de ondas e partículas, ou até (3) como consistindo apenas de partículas, ou mesmo, para finalizar esta breve lista, (4) como não consistindo de nada definido até que alguém o observe. Dentro de cada uma destas classes chega a haver dezenas de interpretações diferentes. Boa parte das afirmações fascinantes da Mecânica Quântica se dá dentro de uma pequena parte destas interpretações, às vezes até misturando indevidamente duas delas.

Em suma, falar sobre a visão de mundo quântica não é fácil, pois há inúmeras visões consistentes com o formalismo da teoria. Assim, ao invés de discorrer sobre elas, tomaremos uma questão que é de particular interesse para filósofos, a questão do papel do sujeito epistemológico na visão de mundo quântica.

¹ Isso é feito através de uma entidade matemática usualmente chamada de “hamiltoniano”. A situação é análoga ao que acontece com a Física Newtoniana. Nesta, é preciso especificar que a lei de força de um dado sistema segue uma dada expressão (por exemplo, uma mola segue a lei $F = -kx$) para se poder calcular o movimento do sistema. Nesse sentido, a segunda lei de Newton faria parte da “linguagem” da Física Clássica.

2. Introdução

O que a Mecânica Quântica traz de peculiar, em comparação com as teorias científicas “clássicas” que a antecederam, é que *a noção de observação é um conceito primitivo da teoria*. Esta afirmação deve soar como música para os ouvidos de filósofos!

Um dos princípios básicos do que pode ser chamada a “teoria transcendental de conhecimento” (para não fazer referência ao nome de uma pessoa) é que um objeto só se coloca de maneira concomitante com um sujeito cognoscente. Não haveria “objeto em si”, coisa em si, realidade independente do sujeito, que seja da alçada do conhecimento científico. O que se conhece é sempre o objeto mediado pelas “categorias do entendimento” do sujeito (como a causalidade, etc.), sujeito este que tem um papel ativo, legislador, para ordenar os dados do sentido, dados estes que também aparecem ordenados pelas formas de nossa intuição sensível.

No entanto, indo de encontro a esta tese fundamental da epistemologia transcendental, a ciência dos séculos XVIII e XIX parecia querer descrever toda a realidade de uma maneira “objetiva”, sem precisar fazer referência a um observador, a um ponto de vista, a um sujeito. O ápice deste movimento “naturalista”, “realista”, “objetivista” seria conseguir descrever todas as propriedades do aparelho cognitivo humano (incluindo a consciência, o livre arbítrio, etc.) através das ciências naturais. Era uma forma de materialismo ou mecanicismo que ainda hoje inspira a pesquisa em ciências naturais, e cuja relação com as teses transcendentais é ainda fonte de muita discussão nos meios filosóficos.

O que aconteceu no final da década de 1920 é que no seio da mais mecanicista das ciências naturais estabeleceu-se uma nova Mecânica Quântica, e todas as tentativas de interpretá-la de maneira realista (Erwin Schrödinger, Louis de Broglie) foram consideradas um fracasso. A visão que se impôs de maneira quase unânime ressaltava uma conexão íntima entre o sujeito e objeto, e daí reside o interesse maior da Física Quântica para a Filosofia.

Nossa questão então é esta: *Qual o papel do sujeito hoje, na Física Quântica, 75 anos depois do seu estabelecimento?* Primeiramente, examinaremos a natureza da inseparabilidade entre sujeito e objeto proposta por diferentes correntes “idealistas” da década de 1930. Veremos então como se deu a reação “objetivista” após a 2ª Guerra Mundial, tanto fora quanto dentro da interpretação ortodoxa. A partir da década de 1970, uma profusão de novas abordagens foram propostas, recolocando o problema do sujeito em novos termos, muitas das quais jogando água no moinho objetivista. Quando parecia que o sujeito poderia enfim ser eliminado da Mecânica Quântica, vimos na década de 90 um renascimento de posições idealistas.

Neste trabalho, descreveremos algumas das interpretações idealistas, examinaremos sua plausibilidade, e tentaremos determinar se alguma das interpretações que se pretendem “objetivistas” conseguiram de fato apresentar uma visão aceitável do mundo quântico.

3. “Medição” é um Primitivo da Teoria

Voltemos primeiramente à afirmação de que a noção de “observação” é um conceito primitivo da Teoria Quântica. Na ciência experimental, quase todas as observações são feitas através da mediação de um aparelho de medição. Assim, ao considerarmos os princípios da Teoria Quântica, constataremos que o conceito primitivo que é usado é o de “medição”. O que significa dizer que tal conceito é um primitivo?

Ao olharmos para as diferentes formulações dos princípios da teoria, veremos que aparecem regras do seguinte tipo: “Após uma medição de uma certa grandeza, se o resultado

q_i for obtido, então o estado do sistema passa a ser ψ_i ". Em tais regras, o que importa aqui é que a noção de *medição* é usada sem que se especifique de maneira precisa o que seja uma medição! Esta é a raiz dos problemas epistemológicos da Teoria Quântica!

Mas o que estou dizendo? Um físico não sabe quando está fazendo uma medição? Eu não sei especificar quando estou fazendo uma observação? Não, não é isso. O que o físico quântico *não* consegue fazer é *descrever o processo de medição como se fosse um fato objetivo*.

4. A Interpretação da Complementaridade

Para entendermos a última frase da seção anterior, consideremos a filosofia da natureza de Niels Bohr. O dinamarquês Bohr ficara famoso em 1913 quando resolvera o problema de como aplicar as idéias de Max Planck, fundador da Teoria Quântica Velha, para a descrição do átomo. Ele era um físico teórico que se destacava não por sua habilidade matemática, mas por sua capacidade de trabalhar com idéias, imagens e com modelos simples. Ele tinha uma habilidade filosófica bastante boa, tendo sido influenciado pelos filósofos dinamarqueses Søren Kierkegaard e Harald Høffding, e pelo psicólogo William James, da corrente pragmatista norte-americana (Jammer 1966, pp. 172-80; Holton 1984).

Em 1927, ele se viu imbuído da tarefa de fornecer uma interpretação para a nova Mecânica Quântica, pois as duas interpretações "realistas" que estavam sendo propostas (a visão ondulatória de Schrödinger e o dualismo realista de Louis de Broglie) estavam cheias de problemas. Esquiando na Noruega, concebeu então o conceito de "complementaridade". Grosso modo, a concepção formulada era a seguinte.

O ser humano desenvolveu seu aparelho cognitivo para se adaptar aos corpos "macroscópicos", ou seja, aos corpos que nos rodeiam e que percebemos. Concomitantemente, desenvolveu uma linguagem que permite a ele se comunicar com os outros e lhes informar do estado de coisas do mundo. Esta foi chamada de "linguagem clássica", pois é a linguagem própria da Física Clássica. No entanto, as entidades microscópicas têm um comportamento totalmente diverso do dos corpos macroscópicos, e nossa linguagem e mente clássicas não conseguiriam capturar adequadamente todos os aspectos de uma entidade microscópica. O que podemos fazer, segundo Bohr, é ora utilizar uma representação *corpúscular* para descrever um experimento, ora utilizar um quadro *ondulatório* para descrever *outro* experimento. Cada experimento envolvendo entidades microscópicas pode ser compreendido *ou* num quadro corpúscular (quando elas exibem trajetórias bem definidas), *ou* num ondulatório (quando elas manifestam padrões de interferência), nunca ambos ao mesmo tempo.

Como exemplo de um fenômeno ondulatório, considere o experimento de duas fendas para intensidades de luz fraquíssimas (Fig. 1). O que se observa na tela detectora é um padrão de interferência, que Thomas Young (1802) explicou supondo que a luz seja um onda. O que ele não sabia é que se a intensidade de luz for muito fraca e os detectores suficientemente sensíveis, o padrão de interferência é formado pelo acúmulo de pontos na tela. Associados a estes pontos, fala-se em *quanta* de luz, ou "fótons". Os fótons correspondem à transferência de uma quantidade discreta de energia do campo luminoso para a tela detectora, sempre de maneira pontual. Não se deve identificar quanta com partículas (a não ser que se adote uma interpretação corpúscular da Teoria Quântica). Partículas ou corpúsculos descreveriam trajetórias contínuas e bem definidas no espaço mesmo quando não forem observados; os quanta se manifestam pontualmente apenas no instante da detecção, e seu comportamento

antes da detecção fica em aberto (ou seja, cada interpretação conta uma história diferente sobre o que acontece com um quantum antes da detecção).

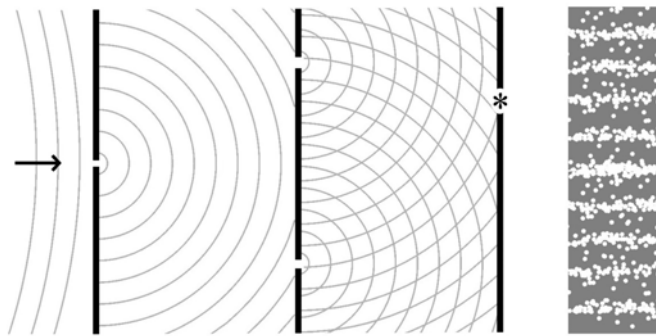


Figura 1. Experimento de duas fendas no regime quântico. A detecção se dá ponto a ponto, formando um padrão explicado diretamente por um modelo ondulatório.

5. O Colapso e a Escolha do Observador

Sempre que se discutem os problemas filosóficos da Física Quântica, é preciso estar atento a qual interpretação está sendo adotada. Na seção 1 mencionamos quatro abordagens interpretativas básicas. No início da década de 30, a visão hegemônica era a interpretação da complementaridade vista acima. Porém, o formalismo mais utilizado envolvia a função de onda $\psi(r)$, e era uma atitude natural considerar que esta entidade matemática correspondesse a uma espécie de onda na realidade. No entanto, esta *interpretação ondulatória* tinha problemas sérios, e quase ninguém acreditava seriamente nela. Como a função de onda $\psi(r)$ independe do observável sendo medido (é invariante ante mudanças no aparelho de medição), é costume considerá-la “objetiva”, mas não “real” (Heisenberg 1958, cap. VIII, p. 78).

Uma noção fundamental da Teoria Quântica é a noção de *redução de estado*. Um objeto microscópico é descrito por uma função de onda $\psi(r)$ que evolui continuamente de acordo com a famosa equação de Schrödinger, até o instante que uma observação deste objeto seja feita. Após esta observação, o estado do objeto (ou seja, sua função de onda) é reduzido de maneira abrupta e descontínua para outro estado. Esta operação formal é conhecida como “redução de estado”, tendo sido apontada primeiramente por Werner Heisenberg (1927) e desenvolvida por John von Neumann (1932). Se adotarmos uma interpretação ondulatória (mesmo que só para efeito de discussão), suporemos que tal redução corresponde a uma transição descontínua na realidade, que chamaremos de *colapso*. Foi Heisenberg quem convenceu a comunidade científica, durante o Congresso de Solvay de 1927, que tal colapso seria provocado pelo *observador*, e não seria um processo que ocorresse espontaneamente na natureza (como supunha Dirac, neste congresso).

Tomemos como exemplo a detecção de quanta por meio de uma câmara de nuvem (Fig. 2). Antes de ser detectada, a radiação é representada por uma função de onda $\psi(r)$ que tem uma forma esférica. Esta forma é necessária para explicar padrões de interferência, como o da Fig. 1. Após a onda incidir na câmara, ela provoca uma primeira ionização, que é visível como um ponto quando adequadamente iluminada. Após esta primeira medição de posição, a onda espalhada é abruptamente reduzida para uma onda estreita, conforme indicada na Fig. 2.

Desta maneira, as outras ionizações que ocorrem se alinham de maneira mais ou menos reta, e temos o que Bohr chamava de fenômeno corpuscular.

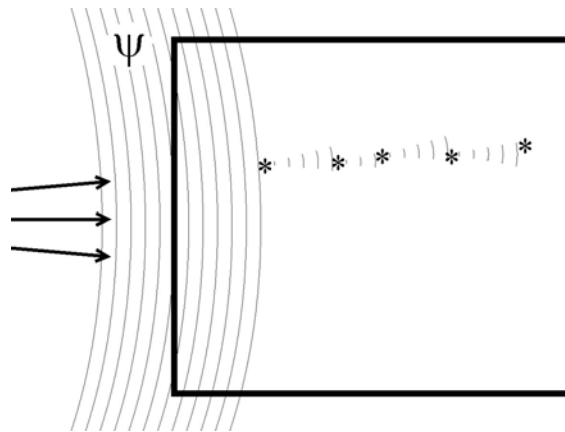


Figura 2. Colapso de uma onda esférica em uma câmara de Wilson.

Notamos que o observador pode escolher se ele quer observar um fenômeno ondulatório ou corpuscular. No primeiro caso, ele pode colocar duas fendas e observar um padrão de interferência numa tela (Fig. 1). No segundo caso, ele pode inserir uma câmara de nuvem e observar uma trajetória. A escolha do observador, porém, não é absoluta. Ele pode decidir determinar a trajetória do fóton, mas será incapaz de prever qual das trajetórias possíveis de fato ocorrerá.

Em suma, há dois tipos de escolhas que o observador pode fazer. Em primeiro lugar, é ele quem escolhe se realiza ou não a medição. Conseqüentemente, para uma interpretação ondulatória, é ele quem escolhe se ocorre um colapso ou não. Isto introduz *um elemento básico de idealismo* na Teoria Quântica, mas tal idealismo é dependente da interpretação que for adotada, podendo ser evitado em uma abordagem positivista.

Uma vez que o observador decidiu que vai fazer uma medição, ele tem uma segunda escolha, a de qual observável medir. Exploraremos mais adiante (seções 8 e 9) como esta possibilidade de *escolha do observável medido* pode radicalizar o idealismo básico da Teoria Quântica.

6. A Cadeia da Observação

Podemos explicar agora porque, segundo a interpretação da complementaridade, a Física não consegue descrever o processo de medição como se fosse um *fato objetivo*. O ponto essencial é que o cientista vive em um mundo “clássico”, ao passo que seu objeto de estudo são partículas microscópicas que habitam um mundo “quântico”.

Uma observação consiste de uma transferência de informação da partícula microscópica para o observador. Por exemplo, queremos medir a posição de um átomo que está em uma “superposição” das posições *A* e *B*. Em outras palavras, é como se ele estivesse nos dois lugares ao mesmo tempo, de uma maneira *potencial*, e só quando fizermos a medição o forcemos a escolher uma das posições. Neste caso de superposição, não podemos dizer: “o átomo está *ou* em *A*, *ou* em *B*, só que por enquanto ignoramos onde”. As razões pelas quais

não podemos dizer isso requereríamos algumas páginas adicionais de texto (ver Pessoa 1997), então pedirei que o leitor aceite esta afirmação.

Temos então um átomo preparado em uma superposição de posições A e B , e queremos medir a sua posição (Fig. 3). Para isso, faremos o átomo incidir em um par de placas detectoras, D_A e D_B , a partir do qual ocorre um processo de amplificação do sinal, aumentando um milhão de vezes sua energia, de forma a poder ser registrado em um aparelho macroscópico (por exemplo, um “osciloscópio”). Conforme o que observarmos na tela do osciloscópio, inferiremos que o átomo estava em A ou em B . Mas espera aí! O átomo estava numa superposição (A “e” B), e no final concluímos *ou* que ele estava em A , *ou* que ele estava em B . Quando é que a superposição quântica se transforma em um estado clássico (A ou B)?

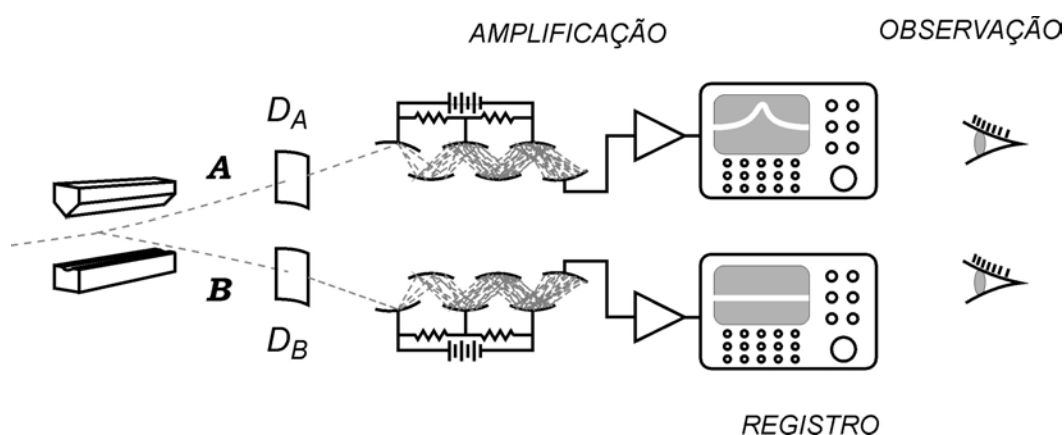


Figura 3. Cadeia da observação, ligando o objeto quântico ao observador. As duas possibilidades (A e B) estão representadas lado a lado.

Alguns poucos físicos acreditam que esta transformação, que chamamos de “colapso”, se dá nas placas detectoras D_A e D_B . Alguns outros defendem que se o colapso não se deu antes, certamente ele ocorrerá na amplificação. Esta visão (de que a amplificação é causa suficiente para o colapso) teve vários adeptos no início dos anos 60, dentro da chamada “abordagem objetivista” ao problema do colapso (seção 15 adiante)..

No entanto, nos anos 30, dentro da interpretação da complementaridade – aceita então pela maioria dos físicos –, a resposta dada a este problema era de outro tipo. Em que etapa do processo de medição se daria o colapso? Resposta de Bohr e de von Neumann: *tanto faz* aonde postulamos que ocorra tal colapso! Tanto faz se dissermos que o “colapso” ocorreu antes, durante ou depois da amplificação! Qualquer opinião que formemos *levará às mesmas previsões observacionais*.

Colocada desta maneira, temos o que é chamado (talvez imprecisamente) de uma posição “positivista”. À ciência só interessariam dados positivos, fatos observados. Se algo não pode ser observado, então não faz sentido postular sua existência. Se tanto faz aonde colocarmos o colapso, então não faz sentido dizer que tal colapso ocorre em um estágio definido do processo de medição, da cadeia de observação. O colapso não descreveria um fato real, mas seria um expediente epistêmico, teórico, que exprimiria uma alteração em nosso conhecimento do mundo.

Concluindo: tanto faz onde colocamos o corte entre mundo quântico e clássico, entre objeto e sujeito. Sujeito e objeto formariam um todo indivisível, inalisável. Como seria

impossível, segundo esta interpretação, separar o sujeito do objeto, entendemos porque não seria possível tratar o processo de medição como se fosse um “fato objetivo”, ao contrário do que ocorre na Física Clássica.

7. Idealismo

A inseparabilidade entre sujeito e objeto implica idealismo?

Vejamos primeiramente o que é *idealismo*. O idealismo defende que a realidade, de alguma forma, depende da mente.

Antes de prosseguir, delimitemos o que seja uma mente. Em nossa discussão, consideraremos a mente como sendo uma propriedade de seres humanos, ou mesmo de outros seres vivos, ou ainda, se se quiser, de andróides. Não consideraremos, por contraste, que a mente seja Deus, ou uma razão absoluta, ou uma mente “social”. A mente, para nós, é o sujeito cognoscente associado a pessoas.

Será que a realidade que me cerca depende da minha mente? Será que o mundo quântico depende de alguma maneira da mente de um cientista observador? Tracemos aqui a distinção entre idealismo e sua antítese, o realismo. O *realismo ontológico* é a tese de que o mundo existe independentemente de nossas mentes, de nossa observação. Quase todos os cientistas acreditam nisto, mesmo Bohr e outros defensores da interpretação da complementaridade. Negar esta tese recairia em um “idealismo ontológico”, que é mais conhecido como *idealismo subjetivista*. Se eu aceitasse o idealismo subjetivista, acreditaria que a realidade é uma espécie de sonho em minha mente. No contexto da Teoria Quântica, o que mais se aproxima disto é o solipsismo associado ao “amigo de Wigner” (seção 12).

O que a interpretação da complementaridade nega no contexto da Física Quântica é o *realismo epistemológico* (Niiniluoto 1987, p. 463), que é a tese de que a teoria se aplica também para a realidade não observada. Esta negação do realismo epistemológico – a negação da possibilidade de se conhecer entidades independentes de qualquer sujeito cognoscente – tem sido chamada de *idealismo epistemológico* (Mehlberg 1980, p. 8). No contexto da Teoria Quântica, porém, usaremos os termos *positivismo* ou “descritivismo” (Niiniluoto 1987, p. 468), como fizemos na seção anterior. Segundo o positivismo, a teoria descreve apenas observações, e não faz sentido perguntar como é a realidade não-observada (por exemplo, se ocorrem colapsos sem que haja uma medição ou observação).

Na Fig. 4, apresentamos um esquema de diferentes posições idealistas e realistas com relação à Teoria Quântica. No topo, a negação do realismo ontológico é o idealismo subjetivista. Aceitando-se o primeiro, pode-se optar pelo realismo epistemológico ou por sua negação, que chamamos de positivismo. Tal positivismo se desdobraria em uma forma mais “subjetivista”, no sentido de que a inseparabilidade entre sujeito e objeto é ressaltada (Bohr 1928; ver final da seção anterior), ou uma forma mais pragmática ou “instrumentalista”, em que atenção é dada somente às previsões da teoria (ilustrada por Wigner 1983, pp. 286-8).

Consideremos agora que posições se desdobram dentro do realismo epistemológico básico. No contexto de teorias científicas, esta visão afirma que a teoria pode descrever corretamente a realidade externa, mesmo aquela que não é observável. No entanto, há diferentes possibilidades com relação ao papel do observador na constituição desta realidade.

Em primeiro lugar, podemos considerar a questão de se o observador é “clássico”, como salienta Bohr (em seu positivismo), ou se ele é imbuído das propriedades essencialmente quânticas. A noção de que o cérebro possa se comportar quanticamente será examinada na seção 13, que trata do “misticismo quântico”, e na seção 14, que versa sobre a interpretação de estados relativos.

Considerando a visão mais comum de que o sujeito é *clássico*, a questão seguinte a ser colocada é *se o observador afeta de maneira essencial a realidade*. Se, como é o caso da Física Clássica, a modificação causada pelo observador (ou pelo aparelho de medição) no objeto puder ser calculada e corrigida, então teremos um “realismo objetivista”, que examinaremos na seção 15. Por outro lado, se na constituição do objeto o observador tiver um papel ativo, “incorrigível”, ineliminável, recairemos numa forma de idealismo no seio do próprio realismo epistemológico! Tal *idealismo parcial* diferiria do “idealismo epistemológico” mencionado anteriormente, pois aqui aceita-se que a Teoria Quântica descreva uma realidade não-observável. O traço idealista vem de que o ato da observação, por si só, pode transformar o estado da realidade, sem que haja uma concomitante ação material (corporal) por parte do sujeito.

A visão mais famosa que se enquadra neste realismo epistemológico em que há um idealismo parcial é a noção de “consciência legisladora” de London & Bauer, que examinaremos na seção 10. Segundo esta visão, de inspiração kantiana, seria a consciência que provoca o colapso do pacote de onda (seção 5), apesar de ela não poder escolher qual vai ser o resultado de uma medição.

Existem também outras interpretações que podem ser enquadradas no rótulo genérico “idealismo”, mas que não se enquadram de maneira apropriada numa corrente realista (ver região cinza da Figura 4). Voltando ao positivismo subjetivista de Bohr (seção 6), um primeiro desdobramento digno de nota foi a análise neo-kantiana feita por von Weizsäcker, que destacou que a *vontade* do sujeito (inseparável do objeto) teria também um papel primordial na constituição do objeto (seção 9). Esta mesma idéia adquiriria uma perspectiva diferente com a análise feita por John Wheeler. Este físico introduziu alguns elementos realistas ao positivismo bohriano, gerando uma visão de mundo um tanto quanto estranha, segundo a qual um passado objetivamente indefinido adquire um aspecto definido (ondulatório ou corpuscular) em consequência de uma escolha feita no presente pelo sujeito (seção 8). Por fim, finalizando este quadro idealista, apresentaremos uma versão *subjetivista* da consciência legisladora, sugerida por Wigner, que empresta do realismo a idéia de que colapsos são reais, mas que chega à conclusão que cada sujeito observa uma realidade diferente (seção 11)!

Ao analisar qualquer interpretação da Teoria Quântica, é possível adotar uma postura mais realista ou menos realista. Ao salientarmos a versão mais realista de cada interpretação, podemos fazer uma distinção entre um idealismo “transformador” e um idealismo “criador”. O transformador (como a de London & Bauer) concebe que a mente *transforma* o estado da realidade de uma maneira essencial. Já o criador postula que de alguma maneira o sujeito *cria* um novo tipo de realidade (como na visão de Wheeler). Um exemplo desta assertiva foi a frase enunciada por Pascual Jordan em 1934: “nós produzimos o resultado da medição” (Jammer 1974, p. 161)!

8. O Idealismo “Criador” de John Wheeler

John Wheeler é um dos grandes herdeiros das idéias de Bohr, mas por ter trabalhado com Cosmologia, foi bastante influenciado pela interpretação dos estados relativos de seu aluno Everett (1957), que examinaremos na seção 12. Desenvolveu uma metafísica baseada na noção de *observador participante*, que olha para si mesmo enquanto atua.

Sem querermos entrar nesta sua concepção idealista, iremos examinar um tipo de experimento que ele explorou bastante, o de “escolha demorada”, que o levou à noção de que o passado se “atualiza” no presente.

Seu ponto de partida é a interpretação da complementaridade de Bohr (seção 4). Conforme este esclareceria melhor a partir de 1935, só podemos chamar um experimento de ondulatório ou corpuscular *após termos feito uma observação*. Antes de concluir o experimento, antes de detectarmos um quantum de energia, não podemos atribuir um ou outro quadro (corpuscular ou ondulatório). A razão para isso seria a possibilidade de realizar um *experimento de escolha demorada*.

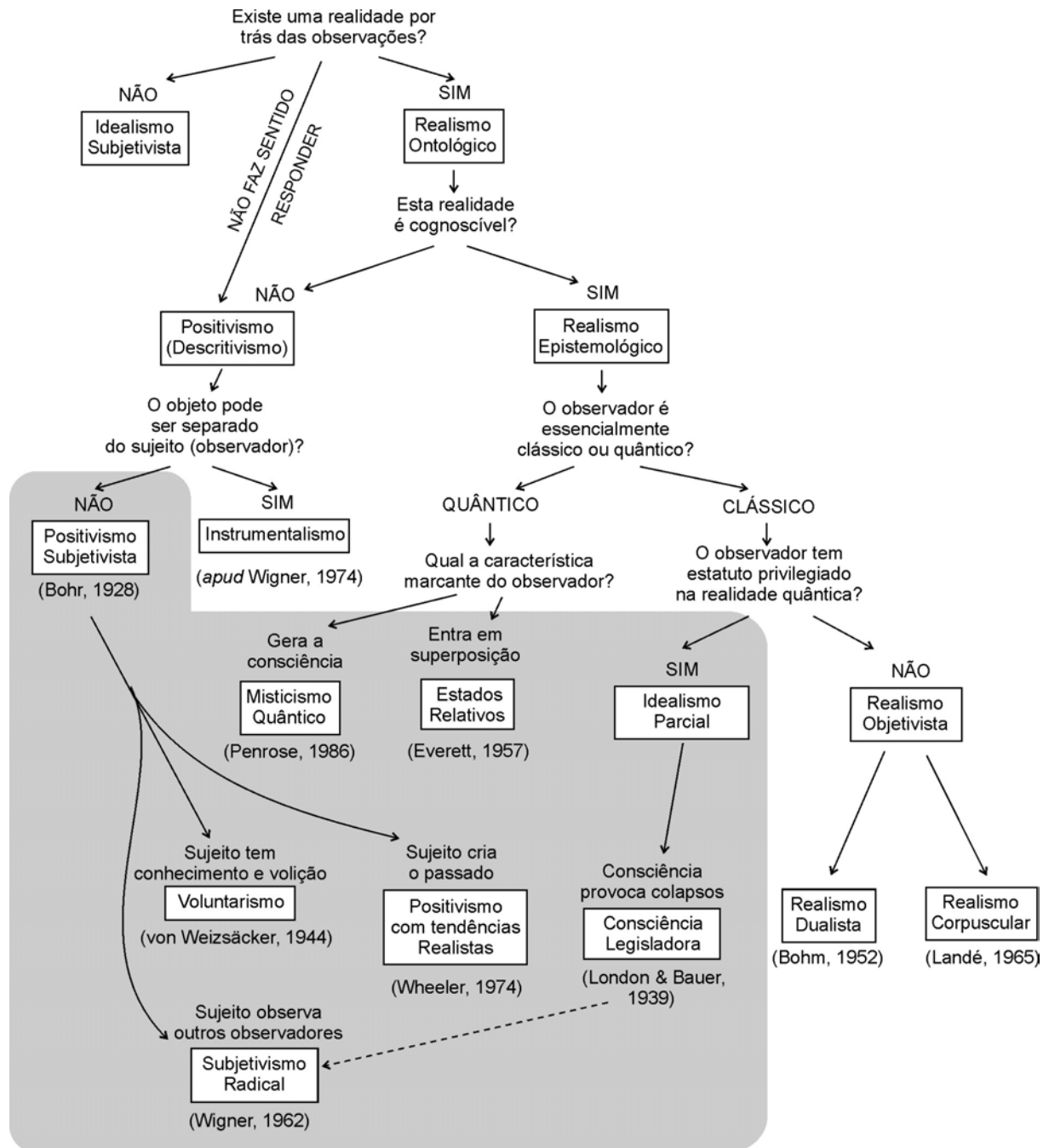


Figura 4. Classificação de visões idealistas da Teoria Quântica (região cinza).

Exemplificaremos este experimento a partir das Figs. 1 e 2. Ambas as figuras apresentam uma onda esférica que se propaga a partir da esquerda. Se inserirmos um anteparo com uma fenda dupla, teremos ao final do experimento um fenômeno ondulatório (Fig. 1). Ao contrário, se inserirmos a câmara de nuvem, registraremos um fenômeno corpuscular (Fig. 2). Se o fenômeno for corpuscular, podemos inferir uma trajetória percorrida pelo quantum no passado. Se for ondulatório, inferimos que o quantum não teve uma trajetória bem definida, mas propagou-se como onda. Ora, no instante t_0 , antes de inserir os detectores (anteparo e tela num caso, câmara de nuvem no outro), o objeto quântico ainda não decidiu se “é onda” ou “é partícula”. Ou seja, no instante t_0 nada pode-se dizer sobre sua natureza no próprio instante t_0 . No entanto, após finalizado o experimento, no instante t_1 , aí sim eu posso dizer se a realidade em t_0 era ondulatória ou corpuscular, dependendo da escolha que foi realizada.

Segundo Wheeler, poderíamos dizer que, segundo esta visão, “o passado se atualiza no presente”. Nas suas palavras:

É errado pensar naquele passado como “já existindo” em todos os detalhes. O “passado” é teoria. O passado não tem existência enquanto ele não é registrado no presente. Ao decidirmos quais perguntas o nosso equipamento quântico de registro irá fazer no presente, temos uma escolha inegável sobre o que temos o direito de perguntar sobre o passado. (Wheeler 1978.)

Esta concepção é usualmente interpretada de maneira mais realista do que faria Bohr. Para Bohr, nada se poderia falar sobre o passado antes de finalizado o experimento. Por contraste, da maneira como este idealismo “criador” é usualmente exposto, *o passado teria uma realidade* antes de concluído o experimento – uma realidade indefinida. A observação *alteraria esta realidade passada* para um aspecto ondulatório ou corpuscular. (notem que seria a realidade *passada* que mudaria, e não nosso conhecimento sobre esta realidade).

9. O Idealismo Voluntarista de von Weizsäcker

A situação explorada por Wheeler já era conhecida na Física Quântica, porém sem o viés realista mencionado na seção anterior.

Com a ida de Heisenberg para Leipzig, no final da década de 20, tinha-se um centro fervilhante não só de Física Quântica, mas também de Filosofia da Teoria Quântica, devido à presença do jovem físico Carl von Weizsäcker e da filósofa Grete Hermann. Esta havia sido assistente de Leonard Nelson, filósofo radicado em Göttingen que havia recuperado a abordagem de Jacob Fries, discípulo de Kant, em busca de um “filosofar cientificamente controlado” (Soler 1996, pp. 15-8). Um dos resultados das discussões filosóficas travadas por este grupo foi a elaboração de uma “interpretação kantiana” da Teoria Quântica. Tal projeto de cotejar a filosofia kantiana com a Física Quântica também foi desenvolvido por Ernst Cassirer em 1937 (uma análise deste projeto é apresentada por Soler, 1996, pp. 125-73).

A tese básica do grupo de Leipzig era de que a categoria da causalidade permanecia intacta na Física Quântica, apesar da imprevisibilidade inerente a esta Física. O que teria sido perdido com a Teoria Quântica seria a possibilidade de se fixarem as condições iniciais exatas de um sistema (devido ao princípio de incerteza), e não a evolução causal do mesmo. Segundo von Weizsäcker, em uma obra traduzida para o português durante a 2^a Guerra Mundial, a Mecânica Quântica renunciaria a um *princípio de objetividade*:

O conceito de objeto não poderá mais ser utilizado sem estar referido ao sujeito do conhecimento. [...] Em toda proposição visando uma descrição da natureza, apenas entram duas funções fundamentais da consciência: o saber e o querer (von Weizsäcker, 1945, p. 127).

Para entender por que ele introduziu a vontade (o “querer”), é preciso mencionar uma interessante descoberta que ele fizera em 1931 ao analisar, a pedido de seu orientador, o microscópio de raio gama (que Heisenberg utilizara em 1927 para explicar o princípio de incerteza). Este instrumento idealizado permite medir *ou* a posição de um elétron, *ou* o seu momento linear (velocidade vezes massa), fazendo incidir nele radiação gama (uma luz de alta energia). Ajustando-se o microscópio com a tela detectora no “plano de imagem”, determina-se a posição final do elétron; ajustando-o com a tela no “plano focal”, determina-se o momento linear final do elétron. Ora, tal escolha sobre onde colocar a tela pode ser feita mesmo depois que o raio gama passou pela lente do microscópio! Temos exatamente a situação de um experimento de escolha demorada, como aquele descrito na seção anterior.

Há porém uma característica adicional no experimento examinado por von Weizsäcker. O sistema por ele considerado envolve dois quanta correlacionadas, o elétron e o fóton do raio gama. Ao detectar-se o fóton, ocorre um colapso na função de onda do elétron (ver seção 5), e adquire-se informação sobre o seu estado final sem que ele seja destruído (de forma análoga à montagem que Einstein, Podolsky & Rosen propoem quatro anos depois) (ver Jammer 1974, pp. 485-6). Ora, poderia acontecer de o elétron estar muito distante do microscópio, poderia estar até na estrela Sírio. Conforme a escolha de minha vontade livre, posso fazer com que o estado final de um elétron em Sírio seja uma onda esférica (medição de posição) ou uma onda plana (medição de momento linear).

Eis uma forma notável de idealismo na Teoria Quântica. Se atribuirmos uma espécie de realidade para a função de onda $\psi(r)$, como faz a interpretação ondulatória, teríamos um exemplo de idealismo no qual a vontade do sujeito pode afetar instantaneamente a realidade distante. Tal poder, porém, não é suficiente para propagar sinais superluminais, como demonstra um teorema simples desenvolvido no contexto dos trabalhos mais recentes de John Bell (Eberhard 1978).

10. A Consciência Legisladora no Idealismo de London & Bauer

Nos anos 30, uma forma muito influente de idealismo foi desenvolvida, ao se tentar explicar porque um colapso está sempre associado à observação. O ponto de partida foi dado por von Neumann, que argumentou, conforme vimos, que o corte entre objeto e sujeito pode-se dar em qualquer lugar entre a cadeia que liga o sistema quântico ao observador (Fig. 3). Assim, não haveria contradição em supor que a superposição de estados do objeto microscópio poderia se estender ao aparelho de medição, ao olho do cientista, e até ao seu nervo óptico, desde que se mantivesse um corte entre o nervo óptico e um observador último. Mas, então, qual seria a essência deste observador último, que sempre pode ser cortado do objeto?

A opinião de von Neumann era de que seria a *consciência* (ver Jammer, 1974, pp. 479-82). Não encontrei uma citação explícita de von Neumann a este respeito, mas alguns anos depois o físico alemão Fritz London e o francês Edmond Bauer popularizaram essa opinião de que o colapso só poderia ser explicado invocando-se a presença de um ser consciente.

Eles consideraram a cadeia que consiste no objeto quântico, no aparelho de medição e no observador consciente. Conforme vimos, a evolução unitária (equação de Schrödinger)

prevê que a superposição microscópica se *estende* para o aparelho e mesmo para a consciência:

“Objetivamente” – isto é, *para nós* que consideramos o sistema composto x, y, z , como “objeto” – a situação parece ter se alterado pouco comparado ao que acabamos de encontrar quando estávamos considerando apenas aparelho e objeto. [...] Assim, a função $\psi(x,y,z)$ representa uma descrição máxima do “objeto” composto, consistindo do objeto efetivo x , do aparelho y e do observador z ; e contudo não sabemos em qual estado está o objeto x .

O observador tem uma impressão completamente diferente. Para ele é somente o objeto x e o aparelho y que pertencem ao mundo externo, ao que ele chama de “objetividade”. Por contraste, ele tem *consigo mesmo* relações de caráter muito especial. Ele possui uma faculdade característica e bastante familiar que chamaremos de “faculdade de introspecção”. Ele consegue acompanhar de instante para instante o curso de seu próprio estado. Em virtude deste “conhecimento imanente” ele atribui a si mesmo o direito de criar sua própria objetividade – isto é, cortar a cadeia de correlações estatísticas [...] declarando: “Eu estou no estado w_k ” [...]

Assim, não é uma misteriosa interação entre o aparelho e o objeto que produz um novo ψ para o sistema durante a medição. É somente a consciência de um “eu” que pode se separar da função prévia $\psi(x,y,z)$ e, em virtude de sua observação, *montar uma nova objetividade* ao atribuir ao objeto de agora em diante uma nova função $\psi(x) = u_k(x)$. (London & Bauer, 1939, pp. 251-2).

Jammer (1974, pp. 482-5) fez um breve estudo das influências filosóficas de London, que antes de se tornar um importante físico teórico havia feito um doutorado em filosofia em Munique (1921) sob a orientação de Alexander Pfländer, seguindo a tradição da teoria psicológica da empatia de Theodor Lipps. A concepção de London sobre o problema mente-corpo foi também bastante influenciado por outro professor, Erich Becher, que, influenciado por Spinoza, defendia a doutrina “interacionista” segundo a qual os processos físicos cerebrais produzem efeitos psíquicos que, por sua vez, afetam os processos físicos.

Outro físico importante que defendia explicitamente que a consciência é essencial na observação, e portanto no colapso, foi Walter Heitler (1949). Ele analisou a possibilidade de se completar uma observação por meio de um aparelho auto-registrador, consistindo de duas telas fotográficas. Isto corresponderia à Fig. 2, retirando-se a câmara de nuvens e colocando duas chapas fotográficas paralelas, que não absorvem partículas. Considerando a passagem de apenas uma partícula carregada, temos certeza (para eficiências de detecção de 100%) que, após serem reveladas, ambas as chapas apresentarão uma marca aproximadamente no mesmo ponto do plano das chapas. Heitler argumentou que o colapso pode ser produzido pela segunda chapa, se esta for revelada primeiro:

[...] A primeira tela auto-registradora, por si só, não traz certeza para [o resultado de] observações futuras, a não ser que o resultado seja reconhecido por um *ser consciente*. Vemos, portanto, que aqui o *observador* aparece como uma parte *necessária* da estrutura inteira, e em sua plena capacidade enquanto ser consciente. A separação do mundo em uma “realidade externa objetiva” e “nós”, os espectadores auto-conscientes, não pode mais ser mantida. Objeto e sujeito tornaram-se inseparáveis um do outro [...] (Heitler, 1949, pp. 194-5)

Outros cientistas que defenderam explicitamente posições semelhantes foram o físico James Jeans (1943), o astrônomo Arthur Eddington (1928) e o bioquímico John Haldane.

Wigner (1964) resumiria da seguinte maneira esta concepção:

[...] os físicos concluíram ser impossível fornecer uma descrição satisfatória de fenômenos atômicos sem fazer referência à consciência. Isto [tem a ver com] o processo chamado “redução do pacote de onda” [...] A consciência evidentemente desempenha um papel indispensável.

11. Extensão do Idealismo para Objetos Macroscópicos

Este idealismo em que a consciência tem um papel legislador se tornaria mais radical ao incluir a possibilidade do objeto ser um corpo *macroscópico*. Esta possibilidade surgiu a partir da célebre descrição do “paradoxo do gato” feita por Schrödinger (1935, p. 157). Seu objetivo era mostrar que a Mecânica Quântica e sua interpretação ortodoxa não podiam constituir uma teoria completa, já que ela levava a paradoxos.

Um gato seria fechado dentro de uma câmara de aço junto com um pouquinho de uma substância radioativa, que teria uma probabilidade $\frac{1}{2}$ de acionar um detector, dentro de um certo intervalo de tempo. Ligado a este detector haveria um “dispositivo diabólico” que funcionaria de tal maneira que se o detector fosse disparado, o gato seria morto, enquanto que ele permaneceria vivo se nenhuma radiação fosse detectada no intervalo de tempo.

A Mecânica Quântica descreve o estado do átomo radioativo como uma superposição de estados de emissão e de não-emissão. Como o sistema todo está enclausurado em uma caixa, que se supõe isolada do ambiente, a evolução deste sistema composto é unitária (descrita pela equação de Schrödinger). Se o gato estiver acoplado de maneira apropriada ao sistema quântico, a superposição deste se *estenderá* ao gato. Ao final do intervalo de tempo, o sistema composto estaria em uma superposição, com uma amplitude correspondendo ao gato vivo somada a outra correspondendo ao gato morto. Esse estado paradoxal perduraria enquanto nenhuma observação fosse feita. Só quando alguém olhasse para dentro da caixa é que ocorreria um colapso de estado, ou para gato vivo ou para gato morto!

A aceitação desta conclusão leva a uma extensão do idealismo para objetos que podem ser macroscópicos. Neste contexto, uma versão “subjetivista” do idealismo aparece a partir de uma situação imaginada por Eugene Wigner (1962).

12. O Amigo do Solipsista

Suponha que no experimento do gato, descrito na seção anterior, houvesse duas pessoas envolvidas, o “cientista”, que não estaria envolvido diretamente com a observação dentro da caixa, e um “amigo” seu, este sim responsável pela observação. Aceitando-se a interpretação idealista na qual a consciência tem um papel legislador, examinemos como cada uma das pessoas envolvidas explicaria o experimento. Na visão do amigo, haveria uma superposição de estados macroscópicos (gato vivo + gato morto) até o momento em que ele abrisse uma janelinha e visse o gato em um destes dois estados, provocando um colapso.

Mas o que diria o cientista a respeito de seu amigo? Digamos que o amigo está, por sua vez, dentro de um laboratório hermeticamente isolado do ambiente, juntamente com a caixa contendo o gato. Da óptica do cientista, o sistema envolvendo gato e amigo está numa superposição do seguinte tipo: “gato morto e amigo vendo o gato morto” + “gato vivo e amigo vendo-o vivo”. Ou seja, para o cientista ainda não aconteceu um colapso, ao passo que para o amigo a situação já está definida.

A consequência desta situação – imaginada até certo ponto por London & Bauer (1939) e mais detalhadamente por Wigner (1962) – é que a realidade do mundo (supondo que

o colapso consiste de um processo real) não só é afetada de maneira essencial pelo observador, como também ela *será diferente* para cada sujeito diferente. Note que o que está ocorrendo nesta interpretação não é que a realidade *parece* diferente para cada sujeito, mas ela efetivamente é diferente! Esta então é uma forma subjetivista do idealismo legislador, ou, se se quiser, uma interpretação “solipsista”.

É preciso ressaltar que Wigner não defendeu este solipsismo em seu artigo. Para resolver o “problema do amigo de Wigner”, como ficou chamado, ele concluiu que o colapso ocorre sempre que uma consciência interage com um sistema quântico, em concordância com London & Bauer. Assim, o amigo e o gato não entrariam numa superposição quântica, conforme descrito acima. Sugeriu, porém, uma explicação nova para isso: em seres vivos, em especial naqueles com consciência, a equação de Schrödinger (que rege a dinâmica de sistemas fechados) passaria a ter um termo adicional, não-linear, que daria conta (segundo o projeto de Wigner) do colapso provocado pela consciência.

A explicação proposta por Wigner constitui uma solução ao chamado “problema da medição”, até hoje sem solução consensual (ver Pessoa 1992). Como poucos aceitam a tese wigneriana de que em tecidos de seres vivos a equação de Schrödinger se modifica, o problema do amigo de Wigner continua a despertar interesse, e a interpretação subjetivista (solipsista) mencionada nesta seção permanece uma alternativa defensável no amplo espectro de interpretações idealistas da Teoria Quântica.

13. Estados Relativos de Everett

Nas interpretações idealistas vistas até aqui, reconhece-se que haja uma divisão do mundo entre uma parte quântica (em geral associada ao mundo microscópico) e clássica (associada ao macroscópico e ao observador), apesar de se reconhecer que a linha divisória entre estes dois mundos não é clara. Existe porém uma interpretação bastante radical e elegante que resolve diversos dos problemas filosóficos da Física Quântica baseando-se na idéia de que tudo é quântico, inclusive o observador.

A interpretação dos estados relativos de Hugh Everett (1957) foi desenvolvida na tentativa de aplicar a Teoria Quântica para o universo como um todo (na Cosmologia), contexto no qual não se pode falar em observadores externos que fazem medições e provocam colapsos. Ora, se o universo como um todo puder ser tratado pela Mecânica Quântica usual, então ele poderá entrar em superposições, e com isto nós, seres humanos, também poderíamos entrar em superposição!

Considere a cadeia de observação descrita na seção 6 e na Fig. 3. Quando ocorre o colapso? Everett respondeu: ele nunca ocorre! O próprio observador entraria em superposição ao observar o ponteiro do aparelho de medição, que estaria em superposição devido à sua interação com o objeto microscópico. O observador assim se desdobraria em duas “amplitudes” ou ramos do mundo. A amplitude que observou um dos autovalores (ou seja, o observador em um dos ramos do mundo) não tem acesso às memórias da outra amplitude que observou o outro autovalor (ou seja, o observador no outro ramo). Assim, eles existiriam em mundos paralelos! Cada vez que uma observação fosse feita, o mundo se ramificaria em amplitudes diferentes, e nós aqui estaríamos habitando apenas um destes ramos dos muitos mundos!

Vemos assim como esta interpretação leva adiante o solipsismo da visão subjetivista da seção anterior. Naquela tínhamos um mundo diferente para cada sujeito; aqui temos o próprio sujeito se desdobrando em vários sujeitos, cada qual vivendo em um dos possíveis mundos!

Apesar da loucura desta interpretação, ela é defendida por muitos físicos respeitáveis, especialmente aqueles interessados em Cosmologia ou ligados à noção de decoerência (ver seção 16).

14. O Cérebro Quântico

Vimos na seção 10 como, na década de 1930, popularizou-se a visão de que a mente humana poderia causar um colapso em um sistema microscópico. O outro lado desta moeda seria a visão de que o mundo quântico tem um papel essencial na constituição da mente. Tal tese já aparecera na década de 30, por exemplo na seguinte defesa do livre arbítrio feita por Eddington em 1932 (ver Jammer 1966, p. 337), referindo-se ao princípio de incerteza de Heisenberg:

Se o átomo tem uma indeterminação, certamente a mente humana terá uma indeterminação igual; pois dificilmente poderíamos aceitar uma teoria que faz a mente ser mais mecanicista do que o átomo.

Na década de 90, houve um ressurgimento desta idéia de que a consciência seria um fenômeno essencialmente quântico. O mais importante defensor desta tese é o matemático Roger Penrose (1986), que partiu da constatação (questionável) de que o cérebro humano é capaz de computar funções não-recursivas (por exemplo, ao obter um *insight* que resolve um teorema matemático), o que o tornaria mais poderoso que qualquer computador. Como explicar isto? Penrose é um materialista, então não aceitou a explicação dualista de que haveria uma alma inteligente separada da corpo. Desenvolveu então uma concepção de que alguma propriedade quântica, ainda mal conhecida, seria a responsável por esta nossa grande capacidade intelectual.

Outros autores já estavam explorando idéias semelhantes, como o anestesiológico Stuart Hameroff, que desenvolveu a hipótese de que microtúbulos presentes em todas as células (inclusive dentro de neurônios) teriam uma função cognitiva, além da reconhecida função estrutural e de transporte. Penrose se juntou a Hameroff, e também a uma terceira alternativa, segundo a qual ocorreria o fenômeno de “condensados biológicos” (descritos teoricamente por Fröhlich) no cérebro, e que tal fenômeno essencialmente quântico daria conta da unidade da mente, por exibir “ordem de longo alcance” (ver Penrose 1994, Cap. 7).

Tal abordagem pode ser chamada de *misticismo quântico*, termo que descreve a atitude da maioria dos defensores destas idéias, que partem de uma filosofia de mundo holística e simpática às chamadas “pseudociências” (astrologia, telepatia etc.). A questão do holismo tem uma sustentação bastante forte na noção de “totalidade quântica” formulada originalmente por Bohr e desenvolvida por David Bohm, e envolvida na “não-localidade” sugerida pelo teorema de Bell para interpretações realistas da Teoria Quântica. Pessoalmente não vejo evidência alguma que sustente a tese de que a consciência seja um fenômeno essencialmente quântico (Pessoa 1994), mas certamente ela tem uma posição de destaque entre as interpretações idealistas da Mecânica Quântica.

15. A Reação Objetivista do Pós-Guerra

Após a 2ª Guerra Mundial, ocorreu um esforço para se substituírem as interpretações idealistas da Teoria Quântica por uma visão que eliminasse o observador humano da

descrição quântica da natureza. Tais abordagens podem ser chamadas de “realistas”, no sentido em que concebem uma realidade que pode ser descrita mesmo na situação em que não haja observadores, ou então “objetivistas”.

Podemos mencionar três destas abordagens objetivistas, sendo que centraremos atenção na terceira, que é um desdobramento da interpretação ortodoxa. 1) Uma primeira abordagem é chamada de “interpretação dos coletivos (ensembles) estatísticos”. Ela foi desenvolvida nos Estados Unidos (Slater, Kemble, Margenau), onde reinava uma tradição pragmática, e na União Soviética (Blokhintsev, Terletskii), influenciada pelo materialismo. Outros autores de destaque nesta tradição são Landé, Popper, Bunge e Ballentine (ver Jammer 1974, cap. 10). Não queremos explicar aqui as sutilezas desta interpretação, mas adiantamos que ela é essencialmente uma interpretação corpuscular (Landé 1965) que afirma que a Teoria Quântica não se refere a partículas individuais, mas a uma grande coleção de partículas.

2) Uma segunda abordagem realista que ressurgiu nos anos 50 foi a interpretação dualista de David Bohm (1952), que postulou a existência de partículas com posição e momento bem definidos (aspecto corpuscular) ao lado de um potencial quântico (correspondente ao aspecto ondulatório, ausente da interpretação descrita anteriormente). Esta é uma interpretação determinista, ao passo que uma versão estocástica foi proposta por Bohm & Vigier em 1957.

3) A terceira abordagem se colocava mais próxima da interpretação ortodoxa, e é conhecida como o “programa de amplificação termodinâmica”.

O primeiro passo desta abordagem era simples: substituir o papel fundamental ou legislador do sujeito humano por um papel semelhante desempenhado pelo *aparelho de medição*. Alguns autores se referem a isso como um “subjetivismo objetificado” (Schlegel 1970, p. 78).

No entanto, restava o problema de como “caracterizar” uma medição: que estágio da medição seria responsável pelo colapso do estado quântico? (Lembremos que London & Bauer concluíram que a responsabilidade seria da consciência humana.) A resposta inicial deste programa foi estipular que o estágio crucial seria a *amplificação*. A medição envolveria um processo termodinâmico de amplificação, que se passa em um sistema macroscópico (o aparelho de medição), resultando em um *registro* macroscópico (a posição de um ponteiro ou o registro na fita de um computador), e que é *irreversível*, ou seja, uma vez que um registro fosse obtido o sistema “composto” (objeto quântico + aparelho) não poderia retornar ao estado inicial (anterior ao registro).

Já em 1942, o físico japonês Mitsuo Taketani enfatizara que no processo irreversível de medição o corte na cadeia de observação se daria na amplificação (ver Pessoa 1992, pp. 188-93, para maiores detalhes sobre o tema desta e da próxima seções). Mas a publicação que lançou o novo programa de pesquisa objetivista foi escrito por Jordan (1949), que enfatizava que uma medição é um processo macrofísico real que faz com que duas ondas percam a “coerência”. A “decisão” (redução ou colapso) tomada por um fóton se completaria quando um registro macrofísico aparecesse a partir de um “processo de avalanche”. Segundo esta explicação qualitativa, o observador consciente não seria necessário para que a redução ocorresse.

A ênfase dada por Jordan para o “processo de avalanche” como uma condição suficiente para a redução foi dada de modo independente por Günther Ludwig (1953), para quem o processo de medição envolve um acoplamento entre o objeto microscópico e um aparelho macroscópico em estado “metaestável” (como uma câmara de nuvem de Wilson), resultando em um processo termodinâmico irreversível cujo estado final fixa o resultado da medição.

Este paradigma de amplificação termodinâmica foi compartilhado pela maioria dos físicos preocupados com o processo de medição durante os anos 50. O próprio Bohr (1955, p. 73) passou a caracterizar de maneira mais precisa a observação de um fenômeno atômico como sendo “baseada em registros obtidos por meio de dispositivos de amplificação apropriados com funcionamento irreversível”. Dentro deste programa, considerava-se que o princípio da questão já estava resolvido, tendo-se reduzido o problema da medição ao problema da origem da irreversibilidade em Mecânica Estatística. Restaria apenas uma derivação quantitativa desta irreversibilidade, usando resultados clássicos da Mecânica Estatística, como o teorema ergódico ou o teorema-H.

16. O Programa de Amplificação Termodinâmica

O auge do programa de amplificação termodinâmica foi a teoria de Daneri, Prosperi & Loinger (1962), baseado em condições de ergodicidade definidas alguns anos antes por van Hove. O aparelho macroscópico se encontra inicialmente em um estado de equilíbrio metaestável. Ao ocorrer uma interação com um objeto microscópico, o aparelho passa para um estado fora-do-equilíbrio, caracterizado por uma mudança em certas “constantes de movimento”. O processo de retorno ao equilíbrio é descrito matematicamente de maneira a garantir a perda de coerência dos estados macroscópicos *no limite de tempos infinitos*. A redução de estado do objeto microscópico não se daria durante a interação com o aparelho macroscópico, conforme salientaria Leon Rosenfeld (1965), mas estaria relacionada a um processo que ocorre no aparelho depois que a interação terminou, e que pode ser identificado ao processo de *amplificação*.

É interessante notar que esta abordagem ao problema da medição baseada na amplificação termodinâmica foi bem recebida por físicos próximos à interpretação da complementaridade, apesar de essa abordagem descrever o aparelho macroscópico como um sistema quântico (o que fora anteriormente proibido por Bohr). É também interessante que o fim implícito dessas abordagens objetivistas é o chamado “criptodeterminismo”, já que o resultado probabilístico de uma medição surgiria deterministicamente de condições iniciais desconhecidas no aparelho composto de muitas partículas.

Apesar de o programa de amplificação termodinâmico ter sido hegemônico nos anos 50, ele não estava livre de críticas, que terminariam por minar sua aceitação dentro das comunidades científica e filosófica. O primeiro debate público ocorreu no Simpósio Colston, em Bristol, Inglaterra (Körner 1957, pp. 127-8, 140-7). Ali, o filósofo da ciência Paul Feyerabend defendeu o programa ante as críticas do físico Georg Süssman, que invocava uma demonstração de von Neumann que proibia uma solução exata para o problema. Em defesa do programa, Feyerabend argumentava que as aproximações usadas na passagem de um estado puro para uma “mistura estatística” seriam justificadas, devido à indistinguibilidade entre os dois, *para o observador macroscópico*. Notamos que, com este argumento, o observador seria reintroduzido no problema, minando um grau absoluto de objetividade (voltaremos a este ponto na seção 18)

Durante os anos 60 o programa de amplificação termodinâmica acabou enfraquecendo. Isto aconteceu por dois motivos. Em primeiro lugar, novas versões da já mencionada “prova de insolubilidade” de von Neumann foram produzidas (iniciando-se com Wigner 1963). Isto significava que, para um sistema composto *isolado*, não há uma maneira *exata* de gerar um comportamento clássico no aparelho após sua interação com o sistema quântico microscópico. (Veremos na seção seguinte que tal argumento não deveria afetar este paradigma, já que o aparelho de medição é um sistema aberto, não isolado.)

A segunda razão para a queda do paradigma termodinâmico no tratamento da medição quântica foi um argumento qualitativo. Em 1959, Mauritius Renninger havia criticado a interpretação ortodoxa com base na existência de “experimentos de resultado nulo”. Um exemplo de tal tipo de experimento pode ser dado a partir da Fig. 3. Suponha que o detector D_A e todo equipamento a ele acoplado estivesse ausente. Se, após um certo tempo, o observador não tiver visto nenhum sinal no osciloscópio (supondo perfeitas eficiências de detecção), ele então concluiria que a partícula rumou pelo caminho A , o que equivaleria a um colapso. No entanto, não houve amplificação de sinal. Isto mostra claramente que a amplificação não é uma condição necessária para a redução de estado (apesar de ser, na prática, uma condição suficiente). Tal argumento foi lançado por Klaus Tausk (1966), e divulgado por Jauch, Wigner & Yanase (1967) (ver um exame histórico deste episódio em Pessoa & Freire 2001).

Loinger (1968) defendeu sua teoria argumentando que ela não requeria que ocorresse uma amplificação (ao contrário do que se depreendia do mencionado artigo de Rosenfeld), apenas um acoplamento entre o detector e o objeto quântico (o que seria melhor esclarecido por Dicke 1981). Mesmo assim, seu trabalho deixou de ter o impacto inicial que teve, apesar de outros autores desenvolverem a abordagem termodinâmica nos anos 80.

17. Sistemas Abertos e Decoerência

Vimos que o objetivismo do programa de amplificação termodinâmica saiu de moda no início da década de 70, época em que novas idéias nos Fundamentos da Mecânica Quântica passaram a vigorar. Dentre as novas idéias estava a “abordagem dos sistemas abertos”: a tese de que sistemas *macroscópicos*, como aparelhos de medição, nunca são fechados ou isolados, mas interagem de maneira significativa com seu *ambiente* ou com o resto do Universo (Zeh 1970; Baumann 1970; maiores detalhes a respeito do tema desta e da próxima seções podem ser obtidos em Pessoa 1998).

Uma primeira consequência desta tese era de que as provas de insolubilidade, aplicadas ao sistema composto (objeto quântico + aparelho) *isolado*, não valem mais, já que o sistema composto é aberto. Isto fez com que o paradigma dos sistemas abertos se tornasse um ingrediente essencial na longa batalha por uma interpretação objetivista da Teoria Quântica. Vimos que a abordagem termodinâmica das décadas de 50 e 60 fracassou na eliminação completa do sujeito. Concentrando-se no sistema composto isolado, sua descrição só poderia valer de modo aproximado; ao justificar esta aproximação, argumentava-se que a solução exata e a aproximada eram *indistinguíveis para o sujeito*. Seria talvez possível tentar justificar esta aproximação de maneira objetivista, argumentando que esta indistinguíbilidade prática valeria para qualquer sujeito possível. No entanto, a idéia de sistemas abertos, cujas origens remontam ao final do século XIX, deu a esperança de uma solução mais firme para o problema da objetividade.

Tal esperança, porém, depara-se com um problema semelhante ao enfrentado pela abordagem anterior. É verdade que as provas de insolubilidade não se aplicam ao sistema aberto envolvendo o aparelho de medição, mas se incluirmos o ambiente todo dentro do nosso sistema quântico, então ele se tornaria isolado. Mesmo que este ambiente seja aberto, podemos no limite tomar o Universo como um todo como sendo nosso sistema quântico. Existe um certo consenso de que o Universo seja um sistema isolado, apesar de nem todos concordarem com isso. Mas supondo que ele seja isolado e que a Teoria Quântica se aplique a este domínio, então a prova de insolubilidade se aplicaria para o Universo como um todo, e a

abordagem dos sistemas abertos fracassaria enquanto solução *exata* para o problema da medição. Este é então o “problema do universo isolado”.

Apesar deste problema filosófico, a abordagem dos sistemas abertos desenvolveu, a partir da década de 50, um método matemático muito frutífero para tratar de sistemas abertos. A estratégia é considerar o sistema aberto (que no nosso caso de interesse consiste do aparelho de medição mais o objeto quântico) e seu ambiente como um sistema isolado, aplicar a Teoria Quântica para descrever sua evolução temporal, e, no instante de interesse, aplicar o chamado “traço parcial” para eliminar as variáveis ambientais, resultando em uma descrição estatística do sistema aberto na notação de “matrizes de densidade”. Sempre há uma representação que diagonaliza tal matriz. Tal representação adquire então um estatuto especial, e passa a ser identificado com a base (de auto-estados) do observável clássico que é medido. Em outras palavras, através de uma “decoerência induzida pelo ambiente”, emergiria o comportamento clássico do aparelho de medição. Seria então a interação entre o aparelho e o ambiente que determinaria qual observável é medido pelo aparelho. Se a forma exata desta interação se alterasse, alterar-se-ia o observável medido pelo aparelho.

A “abordagem da decoerência” é, assim, um conjunto de técnicas e resultados teóricos que permitem o estudo de sistemas abertos. Acoplado a estas técnicas há algumas afirmações interpretativas, que variam de autor para autor. Há dois grandes problemas filosóficos associados a esta abordagem e ligados ao problema do subjetivismo.

18. A Fronteira entre o Clássico e o Quântico

O primeiro problema é o da fronteira entre o clássico e o quântico, ou, usando uma expressão de Zurek (1993), o da “emergência da classicalidade”. Lembremos que nos anos 20 e 30, Bohr e von Neumann defendiam que tal fronteira seria arbitrária (seção 6). Nos anos 50, a abordagem termodinâmica postulava uma transição gradual do quântico para o clássico no aparelho de medição. A abordagem da decoerência deu um passo adiante ao propor um critério válido para qualquer sistema, não só para aparelhos de medição. Considere um sistema inicialmente isolado, representado por um estado quântico puro, que passa a interagir com um ambiente com muitíssimos graus de liberdade (ou seja, o ambiente é muito maior do que o sistema). Após um certo intervalo de tempo, aplica-se a técnica do traço parcial para eliminar (integrar) as variáveis do ambiente. A matriz de densidade resultante fornece diretamente o “grau de pureza” do sistema aberto².

Este procedimento é extremamente útil para se medirem “tempos de decoerência” de sistemas quânticos. Para intervalos de tempo curtos em relação ao tempo de decoerência, pode-se afirmar que o sistema aberto não colapsou (no entanto, o formalismo da decoerência não fornece elementos para se afirmar quando o colapso de fato ocorre). Porém, há um problema conceitual ligado a este procedimento. *Qual é a justificativa para se traçar a fronteira entre o sistema e o ambiente?* Por que não incorporar parte do ambiente dentro do sistema? Ou considerar alguns elementos do sistema como fazendo parte do ambiente? Tal problema fez Bell (1990, p. 19) reclamar que “os conceitos de ‘sistema’, ‘aparelho’, ‘ambiente’, implicam imediatamente uma divisão artificial do mundo”.

² A maneira de medir este grau de pureza consiste em avaliar o “traço” – a soma dos elementos diagonais – do quadrado da matriz: se o valor encontrado for 1, o sistema é quântico puro; quanto menor for, mais clássico é o sistema.

A justificativa usualmente apresentada para se eliminarem as variáveis do ambiente é que o nosso “interesse prático” está no sistema objeto, e não no ambiente, ou então que o ambiente “não é observado”. Mas não observado *por quem*? Qual é a justificativa para se colocar a fronteira em um ponto específico entre o sistema quântico e o ambiente? Se a aplicação do traço parcial em um certo ponto for justificado dizendo-se que “as coordenadas ambientais não são observadas ou não são de interesse”, então um elemento de subjetivismo é reintroduzido na descrição do mundo quântico. Seríamos forçados a dizer que o sistema só perde coerência quando escolhemos o que observar ou o que não observar? A abordagem da decoerência poderia ser reconciliada com a objetividade?

Parece que sim. Ao invés de serem os interesses pragmáticos do observador que definem o que é clássico e o que não é, podemos considerar o procedimento de traços parciais como uma maneira de *identificar* sistemas clássicos ou quânticos, como uma maneira de medir o “grau de classicalidade” de um subsistema qualquer. Isso implica, porém, que a justificativa para se tomar um traço parcial não tem nada a ver com o fato de as coordenadas ambientais serem não-observadas ou de não terem interesse prático.

19. O Problema do Colapso na Abordagem da Decoerência

O segundo problema filosófico associado à abordagem da decoerência é o de estabelecer se esta abordagem ajuda a explicar o problema do colapso (o problema da medição). De início, Zurek (1982) manifestava a esperança de que sim, a interação do aparelho com o ambiente poderia ser a chave para se explicar a redução de estado sem necessidade de invocar o postulado da projeção. Ele e outros até anunciaram que o ambiente poderia “monitorar” um sistema aberto, “realizando medições” sem a presença de um ser humano. Se isto de fato fosse o caso, teríamos enfim a vitória do objetivismo!

No entanto, tais esperanças iniciais se mostraram infundadas. Mostra-se que a aplicação do traço parcial equivale à aplicação do postulado da projeção, sendo que este vale para sistemas individuais e o traço parcial para o caso estatístico (que descreve um grande número de casos individuais). Mais importante, o próprio processo de “decoerência induzida pelo ambiente” se aplica apenas para o caso estatístico, de forma que ele *não pode abarcar o problema do colapso*, que se aplica para casos individuais. A decoerência explicaria assim a passagem do quântico para o clássico no sentido de explicar qual é a base ortonormal de auto-estados sendo medida, mas não de explicar *qual* dos auto-estados corresponde ao resultado da medição.

Para responder a esta questão do colapso, Zeh, desde cedo, escolheu a interpretação dos estados relativos de Everett (seção 13). Zurek terminou também optando por esta interpretação, o que claramente mantém um elemento subjetivo na Teoria Quântica. Isto parece sinalizar que, ao final de 75 anos de Mecânica Quântica, o sujeito epistemológico ainda não conseguiu ser exorcizado da teoria.

Porém, como já ficou claro neste artigo, na Filosofia da Física Quântica sempre há bastante margem para manobras interpretativas. É possível acoplar a abordagem da decoerência a interpretações que resolvem de maneira simples o problema do colapso. Uma interpretação que explica o colapso de maneira natural são aquelas que postulam a existência de corpúsculos, como a de Bohm (1952), ou sua versão estocástica (Bohm & Vigier 1957). Outra abordagem é assumir, numa interpretação ondulatória, que os colapsos ocorrem de maneira objetiva, aleatória e não-local (Ghirardi *et al.*; Gisin & Percival). Nestes casos, parece que o sujeito pode ser completamente eliminado.

Neste sentido, é errado afirmar taxativamente que a Teoria Quântica implica o idealismo. Porém, o preço do objetivismo é o comprometimento com uma ontologia inverificável. E, em ambos os casos citados, há problemas teóricos de estender a interpretação para o domínio relativístico.

20. Conclusão

Que conclusão se pode retirar desta longa discussão? Qual o estatuto do sujeito hoje, na Mecânica Quântica? O desejo da maioria dos cientistas e filósofos da ciência, nesta virada de século marcada por um “espírito do tempo” realista, é formular a Teoria Quântica de maneira objetiva, independente de qualquer referência ao sujeito. Infelizmente, *não* podemos declarar que o objetivismo se consolidou! Apesar do idealismo quântico estar menos difundido que nos anos 30, a marcha aparentemente triunfal do objetivismo nos anos 60 e 70 tropeçou novamente no problema do colapso, e nos anos 90 vimos um certo ressurgimento de tendências idealistas. Hoje em dia existem várias interpretações da Teoria Quântica que conseguiram eliminar o sujeito da descrição física do mundo, no entanto tais interpretações têm problemas teóricos que dificultam sua aceitação mais ampla na comunidade científica. O que temos hoje como consenso consiste da velha interpretação ortodoxa, cristalizada no período 1927-35, extirpada de boa parte de seus elementos idealistas originais mas mantendo sua postura instrumentalista (de rejeição à “conversa fiada” filosófica de entidades não observáveis), e remendada com diferentes novidades teóricas, em especial as técnicas associadas à abordagem da decoerência.

Esta interpretação ortodoxa remendada deu dois passos importantes na eliminação do sujeito. Em primeiro lugar, substituiu nos anos 60 o papel “ineliminável” do sujeito epistemológico pelo papel ineliminável do *aparelho de medição* na descrição quântica do mundo. Em segundo lugar, desenvolveu um critério objetivo para traçar *a fronteira entre o quântico e o clássico*, aplicável em princípio para qualquer sistema (não só seres humanos ou aparelhos de medição).

No entanto, estes dois avanços se limitam a uma descrição *estatística*, envolvendo matrizes de densidade. A abordagem ortodoxa não conseguiu resolver tais problemas para o caso *individual*, envolvendo um único objeto quântico em um estado puro específico. Tal problema no caso individual é conhecido como o problema do colapso. Há duas maneiras de tratar deste problema.

A maneira tradicionalmente adotada pela interpretação ortodoxa, e também pela interpretação dos coletivos estatísticos, é ignorar tal problema, considerando-o um pseudo-problema (os argumentos dados são variados). Neste caso, adota-se a velha postura positivista de só se falar daquilo que é observável (no caso da interpretação dos coletivos a situação é um pouco diferente), e neste sentido o sujeito será sempre pressuposto na descrição física (pois não há referência a situações sem observadores), mesmo que sua presença seja ignorada.

A maneira mais realista é fornecer uma descrição para o processo de colapso, e diferentes modelos são fornecidos pelas interpretações da onda-piloto (de Broglie-Bohm), estados relativos (Everett), localizações espontâneas (Ghirardi et al.), etc. Defender qualquer uma destas visões implica um comprometimento ontológico com entidades inobserváveis, mesmo havendo problemas na extensão destas interpretações no domínio relativístico. Este, então, é o preço a ser pago pela eliminação completa do sujeito epistemológico da Teoria Quântica.

Resumindo, o problema do idealismo na Física Quântica é ainda um problema aberto. E por depender da interpretação adotada, este é um problema filosófico. Por envolver aspectos

técnicos, este problema tende a ser ignorado pelos filósofos brasileiros. Espero que este artigo tenha sido compreensível e tenha despertado o interesse de alguns leitores.

Mas que espécie de Filosofia é esta, que não se baseia na exegese dos clássicos? É a Filosofia da Natureza, inaugurada pelos milésios: uma exegese do livro da Natureza!

Agradecimentos

Este trabalho se iniciou na forma de uma palestra realizada em 07/10/1993 no 2º Encontro de Filosofia Analítica realizada em Valinhos, SP. Naquela oportunidade meu prognóstico era mais favorável ao objetivismo, devido a uma crença de que a decoerência seria relevante para o problema do colapso. Tive que preparar o artigo Pessoa (1998) para ter condições de concluir este, em tom menos otimista. Agradeço as pressões de João Carlos Salles e as conversas com Olival Freire Jr.

Referências Bibliográficas

- Bell, J.S. (1990), “Against ‘Measurement’”, em Miller, A.I. (org.), *Sixty-two Years of Uncertainty*, Plenum, Nova Iorque, pp. 17-31.
- Bohm, D. (1952), “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of ‘Hidden’ Variables, I and II”, *Physical Review* 85, pp. 166-93. Republicado em Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 369-96.
- Bohr, N. (1928), “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, *Nature* 121, pp. 580-90. Republicado em Bohr, N. (1934), *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, pp. 52-91, e em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 87-126. Tradução para o português: “O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica”, em Pessoa Jr., O. (org.) (2000): *Fundamentos da Física 1 – Simpósio David Bohm*, Ed. Livraria da Física, São Paulo, pp. 135-59.
- (1955), “Unity of Knowledge”, em Leary, L.G. (org.), *The Unity of Knowledge*, Doubleday, Nova Iorque, pp. 47 ff. Republicado em Bohr (1958), *Atomic Physics and Human Knowledge*, Wiley, Nova Iorque, pp. 67-82. Tradução para o português: “A Unidade do Conhecimento”, em Bohr ...
- Daneri, A.; Loinger, A. & Prosperi, G.M. (1962), “Quantum Theory of Measurement and Ergodicity Conditions”, *Nuclear Physics* 33, 297-319. Republicado em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 657-79.
- Dicke, R.H. (1981), “Interaction-Free Quantum Measurements: A Paradox?”, *American Journal of Physics* 49, 925-30.
- Eberhard, P. (1978), “Bell’s Theorem and the Different Concepts of Locality”, *Il Nuovo Cimento* 46 B, pp. 392-419.

- Everett III, Hugh (1957), “‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics* 29, pp. 454-62. Republicado em Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 315-23.
- Heisenberg, W. (1958), *Physics and Philosophy*, Allen & Unwin, Londres. Tradução para o português: *Física e Filosofia*, Editora da UnB, Brasília, 1981.
- Heitler, W. (1949), “The Departure from Classical Thought in Modern Physics”, in Schilpp, P.A. (org.), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, Open Court, Urbana, pp. 181-98.
- Holton, G. (1984), “As Raízes da Complementaridade”, *Humanidades (UnB)* 2(9), pp. 49-71 (orig. 1970).
- Jammer, M. (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, Nova Iorque.
- (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, Nova Iorque.
- Jordan, P. (1949), “On the Process of Measurement in Quantum Mechanics”, *Philosophy of Science* 16, pp. 269-78.
- Körner, S. (org.) (1957), *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics*. Dover, Nova Iorque.
- Landé, A. (1965), *New Foundations of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press.
- London, F.W. & Bauer, E. (1939), *La Théorie de l’Observation em Mécanique Quantique*, Hermann, Paris. Tradução para o inglês: “The Theory of Observation in Quantum Mechanics”, in Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 217-59.
- Mehlberg, H. (1980), “Philosophical Interpretations of Quantum Physics”, em Mehlberg, *Time, Causality, and the Quantum Theory*, vol. 2 (Boston Studies in the Philosophy of Science 19), Reidel, Dordrecht, pp. 3-74.
- Niiniluoto (1987), “Varieties of Realism”, em Lahti, P. & Mittelstaedt, P. (orgs.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1987*, World Scientific, Cingapura, pp. 459-83.
- Penrose, R. (1986), *The Emperor’s New Mind – Concerning Computers, Minds, and Laws of Physics*, Oxford University Press, Oxford. Tradução para o português: *A Mente Nova do Rei – Computadores, Mentas e as Leis da Física*. Trad. W. Dutra. Campus, Rio de Janeiro, 1991.
- (1994), *Shadows of the Mind – A Search for the Missing Science of Consciousness*, Oxford University Press, Oxford.
- Pessoa Jr., O. (1992), “O Problema da Medição em Mecânica Quântica: Um Exame Atualizado”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência (série 3)* 2, pp. 177-217.

- (1994), “A Física Quântica seria Necessária para Explicar a Consciência?”, em *Questões Metodológicas em Ciências Cognitivas (Coleção Documentos - Série Ciência Cognitiva - 20)*, Instituto de Estudos Avançados, Universidade de São Paulo, pp. 184-9.
- (1997), “Interferometria, Interpretação e Intuição: Uma Introdução Conceitual à Física Quântica”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 19(1), 27-48. URL: http://psbfl.if.usp.br/WWW_pages/Journals/RBEF/Vol19/Num1/index.htm.
- (1998), “How can the Decoherence Approach Help to Solve the Measurement Problem?”, *Synthese* 113, pp. 323-346.
- Pessoa Jr. O. & Freire Jr., O. (2001), “The Tausk Controversy in the Foundations of Quantum Mechanics”, em preparação.
- Schlegel, R. (1970), “Statistical Explanation in Physics: The Copenhagen Interpretation”, *Synthese* 21, pp. 65-82.
- Schrödinger, E. (1935), “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Die Naturwissenschaften* 23, pp. 807-812, 823-828, 844-849. Tradução para o inglês: “The Present Situation in Quantum Mechanics. A Translation of Schrödinger's ‘Cat Paradox’ Paper”, in Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 152-167.
- Soler, L. (1996), “Présentation”, “Postface”, em Hermann, G., *Les Fondements Philosophiques de la Mécanique Quantique*, Vrin, Paris, pp. 13-60, 125-73.
- von Weizsäcker, C.F. (1945), “A Mecânica Quântica e a Filosofia de Kant”, em *Para uma Concepção Física do Universo*, Atlântida, Lisboa, 1945, pp 113-171 (orig. 1944).
- Wheeler, J.A. (1978), “The ‘Past’ and the ‘Delayed-Choice’ Double-Slit Experiment”, em MARLOW, A.R. (org.), *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, Academic, Nova Iorque, pp. 9-48.
- Wheeler, J.A. & Zurek, W.H. (orgs.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton.
- Wigner, E.P. (1962), “Remarks on the Mind-Body Question”, em Good, I.J. (org.), *The Scientist Speculates*, Heinemann, Londres, pp. 284-302. Republicado em Wigner (1967), *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington, pp. 171-84, e em Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 168-81.
- (1964), “Two Kinds of Reality”, *Monist* 48, pp. 248 ff. Republicado em Wigner (1967), *op. cit.*, pp. 185 ff.
- (1983), “Interpretation of Quantum Mechanics”, em Wheeler & Zurek (1983), *op.cit.*, pp. 260-314.
- Zeh, H.D. (1970), “On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory”, *Foundations of Physics* 1, 69-76. Republicado em Wheeler & Zurek (1983), *op. cit.*, pp. 342-49.

Zurek, W.H. (1982), "Environment-induced Superselection Rules", *Physical Review D* 26, 1862-80.

——— (1993), "Preferred States, Predictability, Classicality and the Environment-Induced Decoherence", *Progress of Theoretical Physics* 89, pp. 281-312.