

A Questão da Mecânica Quântica ou de como se Sai um Físico quando É obrigado a filosofar

Antonio J. S. M. Domingues

A incumbência de escrever este artigo tem para mim, devido à sua natureza interdisciplinar, um sabor de entusiasmo (bem como de desafio). Ao perseguir o espírito do mesmo, procurei fazer com que exibisse um real interesse ao meu fictício leitor, supostamente ligado à filosofia. Uma questão, no entanto, se coloca : o que dizer a um tal público sobre este assunto no limitado espaço de uma artigo ? Decidi-me finalmente por apresentar o texto do primeiro capítulo de minha dissertação de Mestrado sem nenhuma modificação (a mesma versa sobre a problemática de fundamentos em mecânica quântica). As razões são duas : em primeiro lugar ele apresenta, de modo (creio) claro e original, a real natureza da teoria quântica e de suas questões centrais. Além disso, quis oferecer aos colegas a oportunidade de apreciar alguém sem nenhuma formação filosófica enfrentando questões de natureza eminentemente conceitual. A este respeito, gostaria de esclarecer que, devido a cobranças e insinuações ocorridas em meu Departamento (« Isto não é física, é filosofia »; « Faça algo sério », etc.), fiz questão de não ler nenhum artigo especialmente filosófico a respeito, de tal modo que todas as reflexões surgidas fossem identicamente ocoríveis a um físico qualquer. Neste ínterim minha bagagem em filosofia ampliou-se um pouco, e talvez preferisse colocar algumas coisas de outro modo, mas optei por deixar o texto intocado com vistas ao objetivo acima citado. Passo então a palavra ao meu Eu de abril do ano passado.

Apresentação

Nossa dissertação de mestrado versa sobre a problemática conceitual em fundamentos da mecânica quântica. Em primeiro lugar procuramos determinar claramente qual a natureza das questões básicas, separando-as da simples confusão conceitual. Estas aliás ocorrem na mecânica quântica, ou melhor, na interpretação da mesma, de diversos modos, por vezes elementares, outras

vezes mais sutis. Feito isso proseguimos nosso trabalho analisando criticamente as diversas interpretações existentes.

Isso no tocante ao trabalho de pesquisa. No que se refere à dissertação, decidimo-nos por uma tarefa que julgamos útil e oportuna, embora não trivial: a de colocar, de maneira clara e acessível não somente a físicos em geral mas também a não físicos com interesse no assunto, a real natureza das questões centrais com que nos deparamos quando procuramos interpretar o formalismo quântico de modo coerente.

Assim, no primeiro capítulo reconstruímos as bases conceituais que implicitamente utilizamos ao elaborar a física clássica, e à luz destas apresentamos o conteúdo da teoria quântica, buscando tornar clara a maneira como esta se insere naquele contexto. A abordagem utilizada aqui difere bastante das usualmente encontradas na literatura.

No segundo capítulo passamos então a uma análise sistemática (intencionalmente evitamos, por razões que ficarão claras, a abordagem histórica) das possíveis interpretações do formalismo quântico. O uso em nossa análise do ferramental conceitual elaborado no capítulo anterior torna a sucessão de alternativas quase natural.

Devido a sua enorme importância para a discussão aqui empreendida o experimento de Berkeley (1986) é descrito no terceiro capítulo, onde também comentamos a natureza das dificuldades experimentais envolvidas, bem como o próximos passos a serem dados nesta área.

Nossa intenção foi a de prestar um serviço à comunidade, esclarecendo questões e discussões notoriamente nebulosas. Procuramos, num primeiro momento, conduzir a análise de um modo acessível também a filósofos, matemáticos e engenheiros, o que implicou em uma certa prolixidade do texto do ponto de vista do profissional de física. O resultado final, contudo, terminou por estar ao alcance não só daqueles profissionais, mas também de leigos dotados de alguma tenacidade, a julgar pelas reações dos que leram o manuscrito. Cremos, também, ter conseguido evitar que o não uso explícito do formalismo matemático comprometesse o rigor ou a clareza do conteúdo. Esforçamo-nos ainda para que o texto fosse de leitura agradável mas, principalmente, acreditamos ter obtido sucesso em nosso objetivo de tornar límpido o quadro conceitual, bem como as alternativas e desafios que nós físicos temos pela frente. Com votos ao leitor de um agradável par de horas, encerramos aqui esta apresentação.

Uma Fábula

Era uma vez, num lugar muito distante e numa época há muito esquecida, uma tribo que vivia de caça. Nossos amigos passavam sempre grandes privações, uma vez que só sabiam caçar com paus e pedras e os animais da região eram todos muito ariscos. Conseguida sempre com muito esforço e suor,

a comida nunca era abundante, e a ameaça de fome fazia parte do dia-a-dia tribal.

E assim seguiam eles no seu espartano *modus vivendi* até o dia em que passou pela região um grupo de viajantes. Com gestos seguros, roupas vistosas e ares de feiticeiros, acamparam nas redondezas e aos poucos ganharam a confiança dos nativos. Compadecendo-se da situação dos mesmos, nossos visitantes decidiram presentear-los com armas eficazes, às quais chamavam de « fuzis ». Explicaram-lhes o princípio de funcionamento e o manejo, fizeram algumas demonstrações e, ao assegurarem-se de que seus pupilos dominavam o manuseio do novo instrumento, despediram-se com votos de fartura e felicidade e seguiram seu caminho.

Desde então a alegria da tribo não conheceu limites. Nunca antes houvera tanta comida, tanta carne tenra, tanto regalo ! A vida virou festa. Qualquer um conseguia atirar, embora alguns fossem sem dúvida mais habilidosos que os demais. Enfim, todos estavam muito felizes. Todos, eu disse ?

Um dentre eles, que se deixara fascinar pela maneira de ser dos estranhos e por seus ensinamentos, resolveu examinar em detalhe a nova arma. As palavras dos mestres ainda lhe soavam claras na memória. E qual não foi sua surpresa ao dar-se conta de que a arma funcionava sem pólvora nem balas ! Não podia ser, não fazia sentido. Algo estava errado. A explicação dos mestres não tinha como estar correta (!). Como era isso possível ?

Temeroso da reação dos demais, nosso curioso aprendiz de feiticeiro compartilhou suas dúvidas apenas com uns poucos amigos mais chegados. Obtendo receptividade por parte de alguns, resolveu arriscar-se a divulgar sua idéias a toda a tribo. « A nova arma, que tanta alegria nos trouxe, definitivamente não é o que nos parecia ser. Ao contrário do que pensávamos, não usa pólvora nem balas. Em princípio não poderia nem atirar, quanto mais matar o que quer que seja. Mas mata, e bem. Em suma, estamos caçando com um instrumento que não entendemos, nem sabemos o que é ou como age. Que efeito terá ele sobre nós ou sobre nossa comida ? Não deveríamos nós nos esforçarmos para compreender melhor a natureza desta arma que se nos tornou tão vital ?

A reação da tribo não se fez esperar. « Ora, deixa de filosofar. Não vês que a arma funciona ? » « As coisas são o que são e não o que deveriam ser, meu caro. » « Por que você não vai caçar alguma coisa em vez de perder tempo com bobagens inúteis ? »

Desde então, a situação não mudou muito na tribo. É bem verdade que muitos se dão conta da problemática e a consideram relevante e difícil de responder. Alguns inclusive dedicam algum esforço a isto. Mas a verdade é que a grande maioria passa ao largo da questão, e por vezes até a ignoram. Afinal, o importante é que a tribo está feliz e com fartura, não é mesmo ? O que importa é caçar. Caçar e comer.

E a tribo prossegue, com todos vivendo felizes para sempre. Pelo menos por enquanto.

Capítulo I

*Um físico é uma maneira que os átomos têm
de saber alguma coisa a respeito de átomos.
(George Wald)*

*Atualmente estou convencido de que física
teórica é de fato filosofia.
(Max Born)*

1.1 Introdução

A fábula acima descreve de maneira razoável, ainda que com algumas ressalvas, a situação da física após o surgimento da mecânica quântica na sua formulação atual, em meados da década de vinte. Talvez a grande diferença seja a de que, no caso da física, não houve nenhum grupo de viajantes sábios presenteando-nos com a nova arma. Uma analogia mais fidedigna seria dizer que nossos amigos simplesmente tropeçaram nos fuzis e descobriram como atirar por tentativa e erro, enquanto que alguns dentre eles, mais argutos que os demais, elaboravam uma tentativa de explicação. Neste ponto da história entra em cena nosso amigo questionador, que na vida real não correspondeu a um, mas a vários físicos, os quais chamaram atenção para incoerências conceituais e divergiram da visão vigente de diversos modos. Dentre eles o mais notório foi sem dúvida Einstein, que jamais aceitou a interpretação ortodoxa do formalismo da mecânica quântica, conhecida como « a escola de Copenhaga ».

Não há palavras para descrever o estrondoso sucesso vivenciado pela mecânica quântica na física do século XX. É com toda a certeza a teoria mais bem sucedida da história da ciência. Seus resultados explicam o comportamento da natureza em dezenas de áreas diferentes, suas previsões são verificadas pela experiência de modo impecável (chegando por vezes a reproduzir o dado experimental até a oitava casa decimal), seu uso aplicado está na base da microeletrônica, da ciência dos materiais, da tecnologia do laser, da Química moderna. O comportamento da luz, dos metais, dos supercondutores, das moléculas orgânicas, dos átomos, dos núcleos, das partículas elementares lhe obedece cegamente, sendo que, até hoje, não conhecemos qualquer limite de

validade para a teoria. Em outras palavras, o mundo material é, sem sombra de dúvida, quântico.

Este estado de coisas explica o descaso que o grosso da comunidade científica nutre pelas questões de fundamento. Porém simultaneamente ressalta a importância destas, pois o fato é que, a sessenta anos de sua descoberta, a teoria mais básica e abrangente da física atual não teve ainda sua natureza abarcada por nós de maneira plena.

Mostrar que estas dificuldades são de fato sérias e inquietantes, e qual a gama de alternativas de que (não) dispomos são os objetivos desta dissertação.

No restante deste capítulo de abertura discutiremos de maneira breve os pressupostos conceituais que sempre adotamos ao elaborarmos uma teoria física (seção 2). Em seguida a mecânica quântica é apresentada, de modo sucinto, em sua formulação atual (seção 3). Por fim, com o intuito de iluminar e ressaltar as estranhezas da teoria, apresentamos e discutimos três situações concretas (experimentos pensados) onde as previsões da mesma violam fortemente nossa intuição, e chegam mesmo a parecer paradoxais (seção 4). No capítulo seguinte, ao debatermos as diversas alternativas de interpretação do formalismo, utilizaremos essas situações para testá-las e lançar alguma luz sobre as mesmas.

Como um último comentário gostaria de ressaltar aos não iniciados que o adjetivo « quântico », utilizado para denominar a teoria, não traz em si nenhum significado especial digno de nota, devendo-se o seu uso a razões históricas. No decorrer deste trabalho utilizaremos indistintamente, as expressões « mecânica quântica », « teoria quântica », « física quântica » e « teoria dos quanta ».

1.2 Um Pouco de Filosofia

Quase todos nós que os dedicamos à física, à matemática ou à filosofia já nos divertimos, pelo menos uma vez, com o argumento solipsista. Trata-se daquela linha de raciocínio que afirma que a única realidade do mundo é a sua consciência, sendo toda a percepção sensorial por você experimentada, seja ela visual, auditiva ou tátil, uma mera alucinação — sonho mesmo — gerada por sua própria mente. Não existe, portanto, nenhuma realidade material externa e independente de você, existem apenas as suas sensações e a sua consciência, sendo todo o restante ilusório : a cadeira onde você senta, o chão, seu próprio corpo, e todas as demais pessoas — inclusive eu que lhe falo.

O argumento solipsista é divertido por duas razões : por ser absolutamente irrespondível, fascina. Além disso, uma vez que se o adota, não se vai mais longe. Ficamos por alguns minutos a rir-nos imaginando uma discussão entre dois solipsistas, cada um afirmando que o outro não passa de uma alucinação de sua mente, e depois esquecemos. Não há muito o que fazer quando se é solipsista.

Porém, pelo menos em um aspecto o solipsismo é bastante útil : ele ressalta o fato de que as únicas realidades realmente inquestionáveis são a minha consciência e as minhas sensações, todo o restante sendo passível de dúvida (*cogito ergo sum*). Para que não caiamos no impasse já citado, é preciso ir além e adotar a hipótese de que as demais pessoas, tanto quanto eu, também são dotadas de consciência própria (sensações e pensamentos).

É nesse ponto que o jogo começa e, uma vez que se escolhe esta linha, os passos seguintes se impõem. Como explicar o fato de duas pessoas diferentes perceberem as mesmas coisas, pelo menos aparentemente ? Isto é, ambas afirmam verem e ouvirem as mesmas coisas, o livro em cima da mesa, o cahorro latindo, etc.. (Neste ponto o leitor mais criterioso poderia levantar questões de filosofia da linguagem, que por brevidade desconsideraremos.) A solução é postular a existência de algo, externo às nossas consciências, que seja a origem daquelas sensações às quais nós dois damos o nome de, digamos, « livro ».

Aqui é conveniente chamarmos a atenção do leitor para uma questão que em geral passa despercebida. Este ente cuja a existência acabamos de postular (a matéria) é que gera, de algum modo, as sensações por nós vivenciadas, porém não se confunde com estas, absolutamente.

Estes dois seres (a matéria e a sensação), apesar de relacionados de alguma maneira, possuem naturezas distintas, até porque esta é um fato e aquela uma hipótese. Considere, por exemplo, a nota Lá fundamental, que corresponde à onda sonora de 440 Hz. Que não há a menor vinculação entre a nota musical e a vibração no ar é fácil ver. Se conseguirmos desconectar o nervo acústico da região auditiva do cérebro e religá-lo na região que processa a informação visual, cada vez que alguém tocar um violino perto de nós vislumbraremos um clarão, ou qualquer outra sensação visual. O raciocínio análogo pode ser levado a cabo com a onda eletromagnética de 5.500 A e a sensação « verde ».

Podemos, é claro, argumentar que as vinculações entre sensação e matéria se dão no nível da atividade nervosa do cérebro, e não no exposto acima. Terminamos, portanto, por esbarrar no problema da relação mente-corpo, que é uma questão ainda em aberto, não só científica como também filosoficamente. O melhor (?) que podemos fazer no tocante a isto é supor que, mesmo possuindo naturezas distintas, há em algum nível uma correspondência direta entre sensações e algum grupo específico de fenômenos físicos (*e.g.*, a atividade nervosa do cérebro). Segundo esta hipótese, que implicitamente a ciência sempre assumiu, a consciência não é mais do que uma sombra da matéria, um « epifenômeno » como dizem os filósofos, permitindo que nós nos limitemos a descrever a atividade da matéria, cuja dinâmica interna só dependeria de si mesma, como veremos adiante.

Dito isto, voltemos então à linha que estávamos desenvolvendo há três parágrafos atrás. Partindo de nossa própria consciência, uma fato inquestionável, decidimos aceitar a consciência alheia para escaparmos ao marasmo solip-

sista. A partir deste ponto somos levados, quase inevitavelmente, a adotar uma série de hipóteses. A primeira é a de que existe algo (a matéria, o conceito de substância) que produz em mentes diversas sensações correlacionadas. Segue-se a hipótese de que a existência deste algo é independente da mente (« A lua está lá quando ninguém está olhando » ou « Netuno já existia antes de ser descoberto »). Mais ainda : costumamos ir além e fazer a hipótese, aliás bastante forte, de que a mente não afeta de nenhuma forma a matéria, mesmo sabendo que esta afeta a mente por definição. Ou seja, assumimos plenamente, conforme já dissemos, a idéia de que a consciência é apenas um epifenômeno da matéria.

Na vigência deste arcabouço conceitual, o projeto da ciência torna-se claro : trata-se simplesmente de descobrir as leis, expressas matematicamente, que descrevem a dinâmica interna da matéria e, de posse destas, prever e explicar os fenômenos todos da natureza. Como o teste para os nossos conhecimentos são as observações e os experimentos, completa-se a total objetivação (não confundir com objetividade) da ciência com as seguintes hipóteses : a de que a perturbação introduzida pelo aparelho de medida no sistema observado pode ser sempre tornada arbitrariamente pequena, ou pelo menos inferida e calculada, e a de que a interação do dito aparelho com a mente do observador é inócua (trata-se esta de um caso particular da hipótese exposta no parágrafo anterior).

Este é o quadro que sempre regeu a física clássica, e que por três séculos inteiros (do XVII ao XIX) foi de um sucesso absoluto. Porém está longe de ser um quadro conceitual óbvio ou obrigatório, como poderia parecer à primeira vista. Muito ao contrário, é grande o número de hipóteses que têm de ser feitas, e tudo que nos garante a validade das mesmas é a sua adequação aos fatos. Que os filósofos da ciência e os físicos do passado estavam conscientes desta situação nos mostra o artigo de Helmholtz (1887), onde parte desta problemática é discutida.

Mas, afinal, de que maneira o que foi discutido aqui afeta a mecânica quântica ? Na verdade trata-se do oposto : de como a mecânica quântica afeta o que foi discutido aqui. A problemática em questão na Mecânica quântica é antes de mais nada de natureza conceitual (o que não impede que sua solução traga novidades verificáveis experimentalmente). Algumas soluções propostas, conforme veremos no capítulo seguinte, envolvem o abandono de uma ou mais hipóteses entre as citadas acima. É o caso das contribuições de von Neumann, Wigner ou mesmo Bohr, entre outros. Tendo estas considerações em mente, passemos agora à apresentação da teoria quântica, em seus aspectos capitais.

1.3 A Teoria

a. Em que ela difere.

As estranhezas indubitavelmente fascinantes da mecânica quântica estimularam um sem-número de tentativas de divulgação, num nível acessível a leigos, das principais características da nova teoria. Tais textos são bastante

freqüentes em jornais, revistas especializadas em ciência, ou livros de física básica. O objetivo de todos é sempre o mesmo : frisar as diferenças essenciais em relação à física clássica. Os pontos em geral enfocados são ou a dualidade onda-partícula, ou o princípio da incerteza, ou indeterminismo quântico, ou o aparente papel ativo do observador (discutiremos cada um deles oportunamente). Contudo, parece-me que nenhuma dessas características constitui o caminho mais adequado para atingirmos o cerne da questão. No decorrer deste trabalho convenci-me de que um outro fator desempenha aqui o papel central, o qual passo agora a descrever.

Qualquer teoria física consiste em um conjunto de enunciados os quais chamamos de « leis » ou « postulados ». Temos assim as leis de Newton da mecânica, as leis do Eletromagnetismo, os postulados da mecânica quântica. Estas leis definem e relacionam os conceitos envolvidos de forma quantitativa (i. e., matematicamente), de modo a podermos verificá-las experimentalmente. Tudo isso é lugar comum para qualquer pessoa ligada à área técnica. A diferença entre a teoria quântica e as demais teorias, que não é nada óbvia, reside em outro ponto. Trata-se do fato de que estas são todas sem exceção teorias ontológicas — i. e., seus enunciados descrevem como o mundo material é, como ele se comporta. Por detrás destes enunciados está sempre implícito um modelo, uma *picture*, uma hipótese sobre como as coisas são. Por outro lado, nunca é dita nem uma palavra sobre como proceder para verificar as leis, sobre como medir os parâmetros relevantes. Isto porque nas teorias clássicas os processos de medição são sempre considerados óbvios (que dúvidas podem haver em réguas, relógios e balanças ?), e em princípio sempre podem ser feitos com cuidado de modo a não interferir significativamente no experimento, nisto consistindo a arte do experimentador.

Tomemos, por exemplo, a mecânica newtoniana. Nela o mundo consiste de corpos materiais que se movem no espaço de modo determinístico (previsível) ao longo do tempo, e que interagem entre si mediante forças mútuas que podem ser descritas matematicamente, forças estas que alteram o movimento dos corpos de forma igualmente conhecida. Já no caso do Eletromagnetismo também não há dúvida sobre quem são os personagens : o que existe são corpos materiais dotados de carga elétrica, cargas estas que geram no espaço ao seu redor campos elétricos bem definidos, que por sua vez agem sobre as cargas alterando-lhes o estado de movimento, e que podem, em determinadas circunstâncias, existir de forma auto-sustentada sem a presença de cargas, constituindo o que chamamos de ondas eletromagnéticas, das quais a luz é um exemplo.

Sob este aspecto nem mesmo a teoria da relatividade deixa de ser uma teoria clássica. Não há dúvidas sobre como observar o mundo, sobre o que são os objetos observados, sobre como relacionar os dados obtidos por dois observadores. A única questão conceitual relevante desta teoria diz respeito ao novo

status do conceito de tempo decorrente dela. No tocante ao que nos preocupa, é tão clássica quanto as demais.

Retornemos agora à mecânica quântica. No início do século uma série de fenômenos, todos ligados de uma maneira ou de outra ao mundo microscópico (na escala dos átomos), desafiavam a comunidade científica a explicá-los utilizando as leis da física conhecida. Inicialmente a situação aparentava ser simplesmente um caso de inadequação destas últimas ao mundo microscópico, bastando então descobrir quais as leis que descreveriam corretamente o nível atômico sem entrar em contradição com a física já existente.

Porém, a realidade era outra (em mais de um sentido). A comunidade da física de então foi obrigada a admitir que, ao contrário do que se supunha (vide seção 1.2), o processo de medição não é óbvio e sofre restrições essenciais e talvez irremovíveis, e que portanto era imperativo, antes de mais nada, conhecer a natureza destas restrições.

E assim chegamos aos postulados de von Neumann da mecânica quântica. Diferentemente de todos os demais enunciados da física, ele não é um enunciado ontológico, mas sim epistemológico, i. e., refere-se não a como as coisas são, mas sim ao que podemos saber sobre elas. Esta é certamente a melhor chave-de-leitura para entendermos com clareza quais são as dificuldades existentes na exegese da teoria dos quanta, e é a que usaremos.

Apenas um último esclarecimento, antes de prosseguirmos : não faremos aqui nenhuma distinção no uso dos termos « perceber », « observar » e « medir ».

b. O que ela diz

Apesar de historicamente haver sido desenvolvida com o intuito de explicar o comportamento atômico, a mecânica quântica tem, até onde podemos verificar, aplicação universal. Outra maneira de dizer isto é afirmar, à luz do que foi dito acima, que os limites impostos ao que podemos saber a respeito de um sistema físico são sempre os mesmos, obedecem sempre às mesmas regras (a mecânica quântica), independentemente do sistema físico em questão, de sua natureza, de sua ontologia (por sistema físico estamos entendendo qualquer objeto ou entidade material, ou conjuntos destes : um átomo, uma pedra caindo na água, uma bactéria, um raio de luz, etc.).

Esta universalidade da mecânica quântica não está *a priori* em contradição com o fato de não percebermos, na vida cotidiana, nenhuma limitação em nossa capacidade de observar e descrever o que quer que seja, os únicos limites sendo aqueles de ordem prática (a precisão da régua, a definição da chapa fotográfica, a sensibilidade do microfone, etc.). Não percebemos porque, apesar de existirem, esses limites são em geral tão sutis, tão ínfimos que, a não ser na escala atômica, os limites práticos citados acima são sempre mais relevantes, de tal modo que podemos tratar como clássicos os objetos do dia-a-dia (lembremos que por « clássico » estamos entendendo o conjunto de

hipóteses enumeradas na seção anterior). Mais adiante veremos melhor de que forma isto se dá. De qualquer maneira, convém frisarmos que a universalidade da teoria coloca em xeque por si só pelo menos uma das hipóteses que compõem o quadro clássico (a inexistência de restrições ao ato de observar).

Passemos agora ao conteúdo propriamente dito da teoria. Podemos dizer que ela afirma, antes de mais nada, o seguinte: « O resultado de um processo de medição qualquer não é único *a priori*, podendo haver dois ou mais (ou mesmo infinitos) resultados possíveis diferentes. Ou seja, mesmo que partamos das mesmas condições iniciais, não é possível prever antecipadamente o resultado de um experimento. Do mesmo modo, mesmo que uma determinada série de medidas seja efetuada em dois sistemas físicos produzindo resultados idênticos, não podemos concluir baseados neste fato que os dois sistemas encontravam-se na mesma situação antes de se efetuar a medida ».

É justamente esta característica da teoria, acima descrita, que chamamos de indeterminismo quântico. A familiar previsibilidade da física clássica desaparece aqui, dando lugar a uma situação que diverge bastante da que estamos acostumados. Apesar da tentação, deixemos para discutir as possíveis razões deste estado de coisas quando analisarmos as diversas interpretações da teoria, no capítulo seguinte. Porém, um aspecto do que foi dito acima pode ter surpreendido o leitor mais atento. Se a mecânica quântica destrói toda e qualquer previsibilidade da natureza, como é possível ainda ~~queremos~~ fazer ciência, i. e., como podemos querer leis se elas não poderão prever nada? O arguto leitor teria toda a razão se o conteúdo do parágrafo anterior fosse também todo o conteúdo da mecânica quântica. Mas ela diz mais, e é o que veremos agora.

A teoria dos quanta introduz o conceito de « estado de um sistema ». Se por « estado físico » de um objeto (de uma sistema) entendemos a sua situação ontológica, i. e., o que ele é, como ele está, etc., por « estado quântico » estamos nos referindo à sua situação epistemológica, i. e., ao que podemos saber sobre ele, ao que podemos medir, independentemente da natureza do sistema, do que ele seja, de como ele esteja.

A teoria nos ensina a caracterizar, matematicamente, o estado quântico de um sistema (independentemente, ~~repetimos~~, da ontologia precisa do mesmo). De posse deste, a teoria afirma que « os possíveis resultados de qualquer tipo de medida podem ser determinados *a priori* a partir do conhecimento do estado quântico do sistema. Mais ainda, não podemos determinar com antecedência, conforme já dissemos, qual será dentre estes o resultado obtido; porém sabemos como prever com exatidão qual a probabilidade atribuída a cada resultado, i. e., com que frequência relativa eles serão obtidos caso repetamos a experiência uma infinidade de vezes. Do mesmo modo, basta para isso que conheçamos o estado quântico do sistema. »

Trata-se, sem dúvida nenhuma, de uma previsão, e de posse dela podemos agora voltar a fazer ciência (a coerência com a física clássica é assegurada quando notamos que, ao aplicarmos a teoria a processos de medição em casos

clássicos, os resultados possíveis com probabilidade não desprezível se concentram em torno do valor esperado classicamente, com uma dispersão bem menor que as imprecisões usuais dos instrumentos de medida). Contudo a teoria diz mais: ela declara que o estado quântico do sistema (nada afirma, insistimos, sobre seu estado físico) muda com o passar do tempo, e nos ensina a prever esta modificação. É necessário, porém, que primeiro consigamos descobrir a forma de uma determinada entidade matemática, batizada de « operador de evolução », para levarmos a cabo a previsão. É justamente aqui que se localiza talvez a mais importante sutileza da teoria. Vejamos então.

Até este ponto da apresentação do conteúdo da teoria, a situação epistemológica (quântica) e a situação ontológica (física) caminharam paralelas porém disjuntas, i. e., estamos, é claro, todo o tempo supondo a existência do sistema físico sobre o qual podemos ou não saber isso ou aquilo, porém não fizemos nenhuma exigência nem afirmamos nada sobre sua descrição física, a descrição quântica sendo feita de modo independente. Poderíamos, sem dúvida, nos indagar sobre o significado da teoria, i. e., de que modo(s) o mundo tem de (pode) ser, qual ontologia, qual *picture* da mente e da matéria podemos adotar para que não haja contradição com as restrições e regras epistemológicas que acabamos de discutir (lembremo-nos de que o conjunto de hipóteses da seção 1.2 formam um todo ontológico-epistemológico coerente).

Porém, estamos intencionalmente, conforme dissemos, adiando esta discussão para o capítulo seguinte, e limitando-nos a apresentar a teoria. Gostaríamos apenas de apresentar a questão do operador de evolução à luz desta futura discussão.

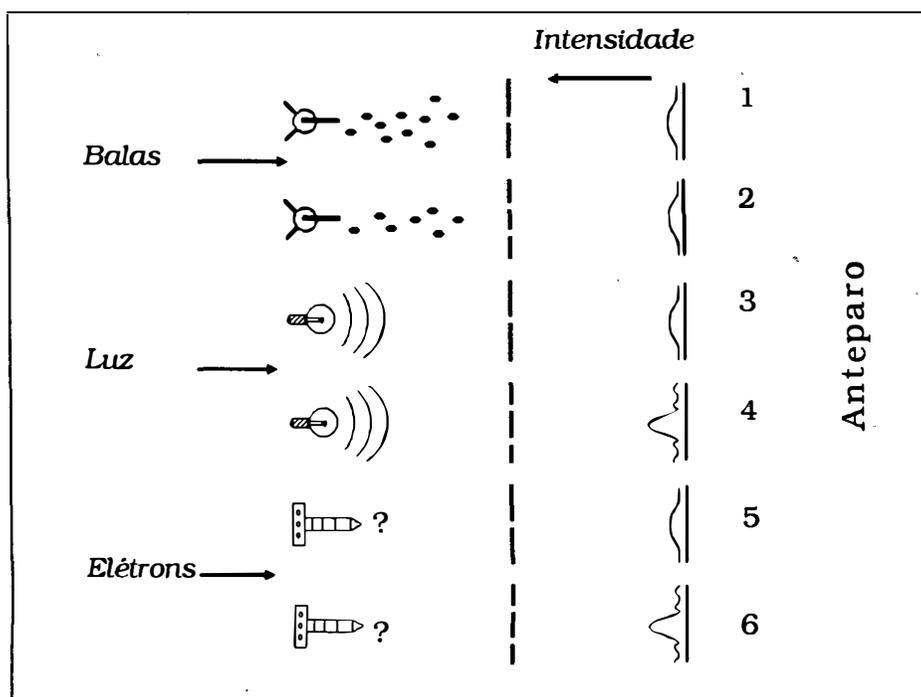
O operador de evolução varia de um sistema físico para outro. Nada a estranhar nisto, pois as mudanças por ele operadas no estado quântico do sistema refletem as mudanças sofridas pelo sistema físico, ou seja, a ação do operador de evolução se vincula aos processos físicos em si. Aliás, para que a teoria quântica não esteja em contradição com a física clássica é preciso que, ao aplicarmos aquela aos processos do dia-a-dia, a ação do operador de evolução reproduza as leis clássicas da física. E de fato assim se dá, em geral. Como na física clássica a epistemologia se superpõe à ontologia, a verificação deste limite — conhecido como princípio de correspondência — é suficiente, assegura a compatibilidade.

(Aproveito o ensejo para chamar a atenção dos colegas sobre esta última frase. Em geral, por não estarmos atentos para a existência destes dois aspectos — epistemológico e ontológico — somos por vezes levados, pelo princípio da correspondência, a atribuir um sentido ontológico ao operador de evolução e conseqüentemente ao restante do formalismo quântico, o que não poderia passar mais longe da verdade. Essa é outra das sutilezas da teoria, que muito contribui para não percebermos a real natureza do problema.)

Mas, de novo, voltemos ao operador de evolução. Ele é um ente do formalismo quântico e, em princípio, nada nos impede de simplesmente

adivinhar a sua forma, a sua estrutura em cada caso. Porém, há um determinado « método » para se construir o operador de evolução correspondente a um determinado sistema físico, e que consiste em transpor, para o linguajar do formalismo quântico, uma determinada imagem física do sistema. Em geral funciona muito bem, por vezes com sutis modificações. Esta é a mais explícita vinculação do formalismo quântico com a natureza física do sistema, e terá de ser levada em conta quando levarmos a cabo a discussão citada anteriormente.

Finalizando esta seção, gostaríamos de insistir em que a mecânica quântica, por ser um enunciado epistemológico, de modo algum responde à questão ontológica. Muito ao contrário, ela praticamente clama por uma ontologia do mundo que lhe seja coerente. É justamente nisto que consiste a problemática de fundamentos em mecânica quântica. Sessenta anos após a formulação de Von Neumann dos postulados da teoria quântica, sua enigmática sócia ainda não apareceu. Desde então o que conseguimos foi confirmar de forma avassaladora o formalismo quântico, numa brilhante carreira cujo lance mais recente é assunto do terceiro capítulo desta dissertação. Conseguimos também neste ínterim mostrar que o mundo, embora ainda não saibamos ao certo como ele é, com toda a certeza não é como costumamos imaginar que ele seja, conforme veremos no capítulo seguinte.



A difração de fenda dupla

Na próxima seção, que encerra este capítulo, apresentamos três situações concretas que ressaltam de modo excepcional a dificuldade em conciliar as previsões da mecânica quântica com nossa forma habitual de pensar e sentir o mundo.

1.4 Três Paradoxos ou A Seguir Cenas do Próximo Capítulo

As situações que passamos agora a descrever são já clássicas na literatura da mecânica quântica, cada uma delas tendo gerado um enorme debate acadêmico, e contribuído ao seu modo para aprofundar nossa (in)compreensão das implicações da teoria quântica. O uso do termo paradoxo não é perfeitamente correto, já que não se trata de contradição, mas sim, de uma violação do nosso bom senso (de nossa ontologia usual).

a. A difração de fenda dupla

A primeira situação que vamos apresentar está ilustrada pelos desenhos da página anterior. Uma característica da teoria quântica da qual quase todos já ouvimos falar é a « dualidade onda-partícula », ou seja, « em determinadas circunstâncias objetos que considerávamos como tendo uma natureza corpuscular podem assumir um comportamento ondulatório, e vice-versa ». Porém, muitas vezes não nos damos conta em profundidade da implicações da dita dualidade.

A real estranheza desta ficará clara ao analisarmos as figuras (desenhadas em perfil). Inicialmente temos uma situação perfeitamente clássica : uma metralhadora atirando em uma parede que apresenta fendas retas horizontais, havendo somente uma fenda no primeiro caso e duas, paralelas e próximas, no seguinte. Atrás da parede se encontra um anteparo no qual se cravam as balas que porventura passam. As curvas desenhadas indicam a intensidade do impacto em cada ponto, i. e., no caso das balas indica a concentração de tiros naquele trecho do anteparo. As balas se dispersam um pouco, como mostra a figura 1, devido a algumas delas se chocarem de raspão com as bordas da fenda.

No caso de duas fendas (figura 2) a situação final do segundo anteparo será dada simplesmente pela soma das balas que passaram por uma ou outra fenda, i. e., a curva de intensidade neste caso é obtida adicionando-se duas curvas idênticas à figura 1, ligeiramente deslocadas. Convém notar que, caso mandemos apenas uma bala, as curvas de intensidade passam a representar então a distribuição de probabilidade de que a bala atinja este ou aquele ponto do anteparo.

A figura 3 nos mostra a mesma situação da figura 1, sendo que neste caso a metralhadora foi substituída por uma fonte luminosa. A luz que atinge o anteparo terá sido um pouco espalhada pelo conhecido fenômeno da difração, resultando em uma curva de intensidade algo semelhante à do primeiro caso.

A diferença surge realmente no caso de duas fendas (figura 4), quando o que vemos no anteparo é um padrão alternado de regiões claras e escuras. Como é sabido, isto se deve ao fenômeno da interferência pois, como se tratam de ondas e não de partículas, mesmo que duas frentes de onda estejam atingindo uma determinada região (o anteparo) elas ora interferirão construtivamente ora se aniquilarão, dependendo da diferença de fase entre elas em cada ponto do anteparo.

Tudo isso é bem conhecido e entendido. Mas e se agora (figura 5), no lugar de balas ou de luz enviarmos à nossa fenda um feixe de elétrons? Veremos então surgir no anteparo (que está, digamos, recoberto com uma substância tal que surge um ponto visível em cada lugar em que se choca um elétron) uma distribuição análoga às das figuras 1 e 3. A surpresa surge no caso de duas fendas (figura 6), pois a distribuição resultante é análoga não à figura 2, mas sim à figura 4!

É a este tipo de comportamento que damos o nome de dualidade partícula-onda. O elétron, que usualmente apresenta um comportamento corpuscular, revela aqui uma fenomenologia tipicamente ondulatória. Porém, há que se proceder com cuidado neste ponto. O leitor desavisado poderia imaginar que os elétrons, quando agrupados em um feixe, interagem entre si de tal modo que acabam por produzir um comportamento ondulatório. O que ocorre de fato é algo muito mais intrigante: cada elétron individualmente apresenta um comportamento tipo onda-partícula.

Para compreendermos bem o que isto significa, consideremos a situação em que estamos enviando apenas um elétron de cada vez em direção à fenda dupla, e aguardamos que apareça o ponto no anteparo que registra a chegada do mesmo antes de enviarmos o seguinte (note que « enviamos um elétron », que « produz uma marca pontual no anteparo », e portanto estamos diante de um comportamento corpuscular). Veremos então surgir um ponto após o outro no anteparo, de maneira aparentemente aleatória. Com o passar do tempo, o acúmulo de pontos gradativamente forma um padrão no anteparo (tal qual o acúmulo de balas nas figuras 1 e 2). Contudo, no caso dos elétrons, o padrão formado vem a ser justamente o da figura 6, característico do efeito de interferência!

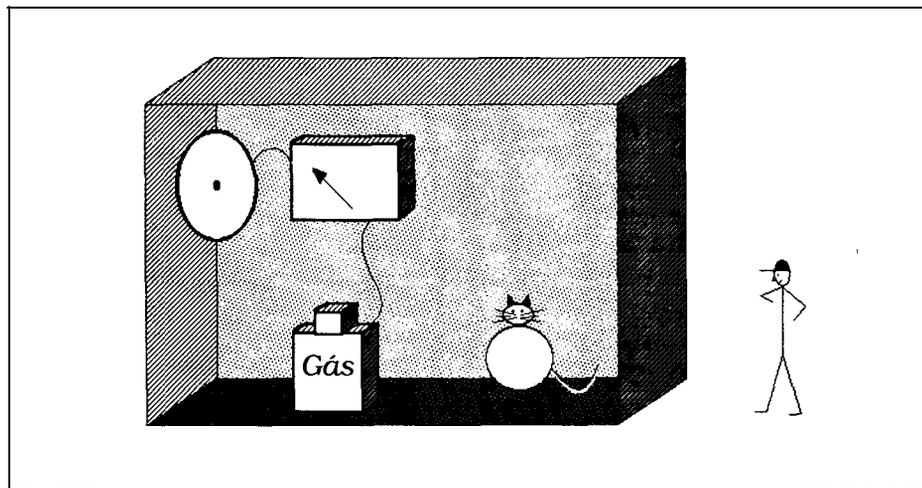
Se de cada vez apenas um elétron estava em jogo, então com quem ele interferiu? Mais ainda: sendo o seu comportamento em cada evento individual tão marcadamente corpuscular, poderíamos pensar em dizer que ele certamente passou por uma ou outra fenda, em cada caso. Porém, se repetirmos o experimento desta maneira com apenas uma das fendas aberta, veremos que o padrão obtido será o da figura 5. Só nos resta uma conclusão: se o elétron de fato passa apenas por uma das fendas, então de algum modo ele « sabe » se a outra está aberta ou fechada.

Este exemplo idealizado (porém factível em laboratório) ressalta de modo excepcional o tipo de estranheza ontológica com que nos deparamos em

mecânica quântica. O que é o elétron afinal : onda, partícula, ambas ou nenhuma das duas ? Qualquer que seja a hipótese ontológica que façamos, terá de se haver com o comportamento acima descrito. Convém notar que a teoria quântica dá conta sem dificuldades do aspecto epistemológico de nosso exemplo : ela prevê com precisão a probabilidade de encontrarmos o elétron em cada ponto do anteparo (nosso aparelho de medida). Ou, se preferirmos dizer assim, ela prevê a curva de intensidade resultante caso enviemos um número muito grande de elétrons.

b. A gata de Schroedinger

Este experimento pensado se deve a Schroedinger, que o apresentou em um artigo de 1935. Um átomo radioativo, que apresenta uma meia-vida de uma hora, é colocado no interior de uma câmara detetora que o envolve completamente. (« Meia-vida de uma hora » significa que a chance de o átomo se desintegrar no transcorrer deste intervalo de tempo é de 50%). A câmara detetora por sua vez está acoplada a um dispositivo eletrônico que, assim que for detectada a emissão radioativa, libertará um gás letal que matará a gata. Tudo isto se encontra no interior de uma caixa fechada.



Nem viva nem morta antes de abrir-se a porta

Portanto, uma hora após prepararmos a situação acima descrita a probabilidade de que o átomo tenha emitido radiação será de 50%. O estado quântico (epistemológico) do sistema inteiro neste instante me diz então que, caso eu abra a porta e observe, tenho 50% de chance de encontrar a gata com vida e outro tanto de encontrá-la morta. Mais ainda : a teoria quântica me afirma que, no exato momento em que eu observar a gata, o estado quântico (que descreve o que eu posso saber ou não sobre o sistema) sofrerá uma mudança brusca do

estado acima para um estado no qual eu sei com certeza (100% de probabilidade) que ela está viva, ou para um outro no qual tenho certeza de que ela está morta. À mudança brusca dá-se o nome de « colapso de estado quântico ».

Mas ora (dirá o arguto leitor referido acima), não há absolutamente nada de estranho nesta situação. O estado quântico simplesmente está descrevendo o estado do meu conhecimento a respeito do sistema. É exatamente o que ocorre quando eu atiro uma moeda para o alto e interrompo o movimento com a mão sem olhar o resultado. A descrição correta do estado do meu conhecimento então é de que o resultado da observação pode ser cara, com 50% de chance, ou coroa, com a mesma probabilidade. Além disso, ao levar a cabo a observação, o estado do meu conhecimento sobre o sistema sofrerá então uma mudança brusca para o estado de certeza. Como podemos ver (prosseguirá ele) não há nada de bizarro no que foi descrito no parágrafo anterior; trata-se, muito ao contrário, de uma situação perfeitamente usual.

Assim, para nossa grata surpresa, vemos que mesmo no contexto da física clássica há situações em que fazemos a distinção entre os níveis ontológico e epistemológico de modo extremamente análogo ao que fizemos até agora. Por exemplo, uma caixa fechada com duas moedas possui um estado epistemológico bem definido, independentemente da situação ontológica em questão : o resultado de uma observação pode ser duas caras, com 25% de chance; duas coroas, também com 25% de chance; e uma de cada, com 50% de probabilidade. Ao efetuarmos a medida o estado epistemológico « colapsa » para um destes valores, com 100% de chance : qualquer observação posterior propiciará sempre o mesmo resultado. Caso fechemos e sacudamos a caixa, o sistema « evoluirá » para o estado epistemológico anterior. A este tipo de descrição epistemológica de um sistema damos o nome de « mistura estatística ».

Podemos até mesmo exibir um análogo do operador de evolução. Consideremos um exemplo algo artificial porém pitoresco : um bêbado, inicialmente agarrado a uma poste, resolve começar a andar, da seguinte maneira : cada passo dado será para frente ou para trás, dependendo sempre do resultado de um lançamento de moeda. Se assim for, mesmo que não o vejamos andar, podemos prever a chance de ele estar a um determinado número de passos do poste após lançamento de, digamos, dez moedas. Ou seja, podemos determinar a mudança do estado epistemológico do sistema com o passar do tempo (como na mecânica quântica), sem que isto se confunda com o fato de que o bêbado está, a qualquer momento, em um determinado lugar bem definido (sua situação ontológica). Este tipo de situação é denominado « processo estocástico »

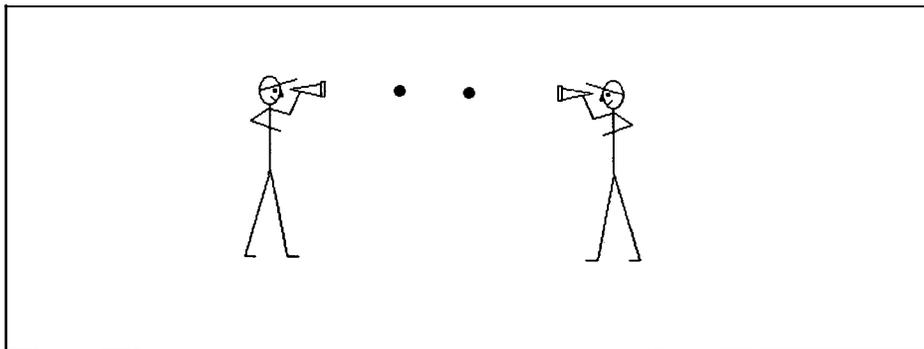
Poderíamos neste ponto ser levados a crer que a mecânica quântica descreve uma situação de natureza idêntica às que acabamos de ilustrar. Acontece, porém, que tal suposição não é correta. Conforme veremos no capítulo 2, é fácil mostrar que as previsões da mecânica quântica não podem ser explicadas pelo raciocínio acima. Se um milhão de pessoas repetir com moedas o procedimento descrito anteriormente, sabemos que 50% verão cara e os demais

verão coroa, porém as moedas já estavam em uma das duas posições antes de serem observadas. É justamente este aspecto que caracteriza as misturas estatísticas. O que se mostra é que a suposição de que o estado quântico descreve na verdade uma mistura estatística de objetos (gatas, por exemplo) é contraditória com as previsões da mecânica quântica, i. e., a diferença entre as duas situações (mistura estatística e estado quântico) é intrínseca e pode ser verificada experimentalmente.

Diante deste quadro somos obrigados a admitir que não faz sentido afirmarmos que, antes de abrirmos a porta e olharmos, a gata já estava viva (ou morta), pois neste caso teríamos uma mistura estatística e não um estado quântico puro. Porém, após a observação feita, ela já se encontra em um estado ou no outro, o que aparentemente confere um papel ativo (no nível físico, ontológico) ao colapso — e portanto ao ato de observar. O que significa tudo isto? Que sentido pode haver em afirmar que a gata não estava nem viva nem morta? Como conciliar esta situação com a nossa percepção habitual da realidade? E o colapso? Qual a natureza do seu aparente papel ativo no processo? (Note que o ato de observar intervém no processo de um modo, em princípio, distinto dos demais eventos naturais, já que no primeiro caso o estado quântico colapsa e nos demais sua mudança no tempo se dá através do operador de evolução; este, conforme vimos, é obtido a partir de uma imagem que temos dos demais eventos naturais acima citados.). Como podemos ver, o experimento pensado de Schroedinger torna mais urgente e desafiadora a tarefa de elaborar uma ontologia coerente com as (de fato) bizarras previsões da mecânica quântica.

c. O « Paradoxo » EPR

O experimento pensado que agora passamos a descrever surgiu pela primeira vez em um artigo de 1935 escrito por A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen. A situação em questão, de importância central na (in)compreensão das implicações ontológicas da mecânica quântica desde então, é relativamente simples em sua concepção: duas partículas afastam-se em sentidos opostos,



O paradoxo ERP

após haverem interagido mutuamente. Passa-se um longo tempo e, já completamente separadas (digamos, afastadas de um ano-luz) uma medição é levada a cabo em uma das partículas. É uma consequência inequívoca do formalismo quântico o fato de que esta medição provoca uma instantânea mudança no estado quântico da partícula restante. Ou seja, se o primeiro observador decidir medir a velocidade (ou posição) da partícula que lhe cabe, então o resultado final da medida (desconhecido a princípio, conforme vimos) lhe permitirá fazer afirmações sobre os possíveis resultados de uma medida (quer da velocidade, quer da posição) levada a cabo sobre a outra; mais ainda, cada resultado possível da primeira medição nos leva a um conjunto diferente de previsões sobre a segunda.

O arguto leitor, nosso velho conhecido, poderia alegar que esta situação corresponde a, por exemplo, dividirmos uma moeda ao meio no sentido longitudinal (de modo que a cara esteja em uma das metades, e a coroa na outra), colocarmos cada metade em um envelope, e enviarmos uma ao Japão e outra ao México. Qualquer dos dois destinatários que abrisse o envelope (efetuasse a medida) afirmaria com certeza qual seria o resultado da medida levada a cabo por seu colega. As duas medições estão, portanto, correlacionadas, o que não implica (como é óbvio, no caso) que haja qualquer influência de uma sobre a outra.

Ocorre que, conforme vimos, os resultados de medidas efetuadas sobre o sistema físico proposto no parágrafo anterior são corretamente previstos considerando-o uma mistura estatística, descrição esta incompatível com a fornecida pelo estado quântico.

A componente chocante do experimento EPR provém da violação da localidade que aparentemente nele ocorre. Toda a física moderna é concebida como sendo local, i. e., nenhum evento físico pode ter consequências instantâneas sobre o que acontece em outras regiões do espaço (o tempo mínimo que tem de haver entre causa e efeito coincide com o tempo que a luz leva para ir de um ponto ao outro). Torna-se claro, então, que qualquer formulação conceitual que atribua um significado ontológico ao estado quântico irá chocar-se, pelo menos em princípio, com a hipótese de localidade ora vigente. Mais geralmente, qualquer hipótese ontológica que façamos terá de dar conta da estranha previsão com que aqui nos deparamos.

Para finalizar, gostaria de comentar que a mudança instantânea no estado quântico da segunda partícula não implica obrigatoriamente em violação de causalidade, pois mostra-se (p. ex., Redhead 1987) que não é possível haver transmissão de informação de um observador para outro, utilizando-se uma montagem tipo EPR. Neste aspecto em particular a situação é equivalente ao exemplo da moeda partida: o fato de o nosso amigo mexicano determinar (ao constatar « cara ») qual será o resultado da « medição » levada a cabo por seu colega japonês não significa, como é óbvio, que o primeiro possa utilizar-se disso para enviar mensagens ao segundo, já que não lhe é possível saber a

priori o resultado de sua própria medição. A diferença relevante aqui consiste em que, no caso da moeda, entendemos bem a origem da correlação (ou seja, dispomos de uma *picture* ontológica coerente com os fatos). No caso quântico, no entanto, não estamos lidando com misturas estatísticas (como vimos, não faz sentido dizermos que a partícula já se encontrava nesta ou naquela velocidade antes de efetuarmos a medição). Assim, a real contribuição do experimento EPR termina por consistir, em última análise, em uma série de restrições às ontologias que porventura venhamos a conceber.

As três situações que acabamos de examinar ilustram de modo bastante agudo a estranheza da mecânica quântica em relação a nossa ontologia usual do mundo. Passaremos agora, no capítulo 2, a examinar as diversas alternativas possíveis e aonde elas nos levaram, ao longo dos últimos sessenta anos.

Ter de interromper aqui a narrativa da tese é deveras decepcionante. A análise crítica das diversas interpretações é o ponto alto da dissertação, e o leitor que porventura tenha gostado do que leu até aqui certamente apreciará o restante. De qualquer modo, espero que o texto apresentado tenha contribuído para esclarecer as questões envolvidas. O texto integral da tese pode ser obtido na biblioteca desta Universidade¹. Assim, me despeço aqui do arguto leitor. Até breve.

1 As referências deste artigo se encontram na bibliografia da tese.