

A INSEPARABILIDADE QUÂNTICA EM PERSPECTIVA, OU POPPER, EINSTEIN E O DEBATE QUÂNTICO ATUAL *

Michel Paty

(Apresentado no Colóquio "Popper e a Ciência de Hoje", Cerisy-La-Salle, 2-11 de julho de 1981, e na 34.^a Reunião Anual da SBPC, 9-7-82, Campinas.)**

A mecânica quântica, operando desde seu nascimento nos mais diversos ramos da física contemporânea, não deixou de ser testada pelos fatos da experiência com sucesso notável. O campo de suas possíveis rejeições é imenso; no entanto, todas as experiências feitas até hoje a corroboram. Porém, ainda se coloca a seu respeito a questão de saber se é uma teoria completa. É necessário, obviamente, distinguir entre uma teoria *completa* e uma teoria *definitiva*: mesmo os seus partidários mais fervorosos não acreditam que a teoria quântica seja uma teoria definitiva e os físicos atuais são mais modestos — ou céticos — a esse respeito que os da época, não tão distante, em que a física clássica parecia estar no ápice do seu acabamento. Certamente, a mecânica quântica constitui, pelos seus conceitos, seus axiomas ou princípios, e o seu formalismo, o núcleo e a estrutura de toda teoria física da matéria: mas ela não esgota estas teorias, posto que ela própria não é uma dinâmica. A eletrodinâmica quântica

* O original francês foi publicado na revista *Fundamenta Scientia*, 3, 1982. Centro de Pesquisas Nucleares e Universidade Louis Pasteur, Strasbourg, França. Endereço Postal: CRN, F-67037, Strasbourg CEDEX.

** Não foi possível explicar com maiores detalhes no presente texto os argumentos caracteristicamente físicos. Para leitura complementar apropriada a não especialistas, recomendo artigos e obras de divulgação já publicados sobre o assunto, e, entre eles, meus "Nouveaux voyages au pays des quanta" no livro *L'Etrange Histoire des Quanta*, de B. Hoffman e M. Paty, col. Points-Science-Seuil, Paris, 1981, em cujo texto é exposta uma descrição, a mais clara que foi possível, dos problemas físicos.

tica na sua formulação bem estabelecida (1), e se apresentam como construções teóricas realizadas a partir dela. Mas essas construções, no seu processo tateante, não se interrogam — no momento — sobre a completude da mecânica quântica, da qual adotam fundamentalmente os princípios (mesmo se colocam algumas vezes o problema da justaposição das concepções quânticas e das exigências relativistas, tão heterogêneas como se sabe). Parece que nenhum corpo de teoria justifica melhor do que estas a asserção de Duhem-Quine sobre a impossibilidade de se testar separadamente suas partes: aqui, não somente o núcleo teórico, mas também as suas proposições fundamentais. Superada a barreira de seu primeiro estabelecimento, escaparia a mecânica quântica da possibilidade de se ver *falsificada*? Sob esta forma provocante, a questão que se delineia é a da estabilidade das concepções que estão na raiz da teoria quântica e que parecem modelar bem, doravante, a abordagem do conhecimento na física. No entanto, estas concepções, precisas no plano formal, tornam-se um tanto nebulosas quanto ao que se convencionou chamar “interpretação” Acima do formalismo e da construção teórica, o panorama das idéias quânticas parece marcado por uma ambigüidade da problemática, ou pelo menos do seu vocabulário, desde que se passe, ao que parece, em certas questões de fundo, indistintamente de uma formulação física a uma formulação filosófica e inversamente.

Mas, na verdade, a distinção é possível: o caso do conceito de inseparabilidade é um testemunho exemplar. Os desenvolvimentos aos quais ele deu lugar após o estabelecimento da mecânica quântica permitiram precisamente resolver a ambigüidade e dar nitidez à imagem que era difusa, centrando separadamente os dois focos, um físico, outro filosófico, de sua problemática. Esta nitidez adquirida sobre o conceito nos conduz a Popper, porque esta se exprime na possibilidade de uma falsificação simples mas de implicação singularmente rica: a da propriedade de não-separabilidade e, ao mesmo tempo, da mecânica quântica. O aspecto picante desta história é que a referência a Popper não se impõe somente pela consideração, em verdade notável mas finalmente muito geral, da falsificabilidade de uma teoria (2), sendo esta teoria a mecânica quântica, pela qual Popper sempre mostrou um interesse preciso; mas porque já nos primórdios desses desenvolvimentos se encontra um raciocínio de Popper, errôneo

(1) — Por exemplo, a que J. von Neumann descreveu no seu *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932); tradução francesa de Alexandre Proca, *Fondements Mathématiques de la Mécanique Quantique*, Presses Univ. de France, Paris, 1947.

(2) — Karl Popper, *Logik der Forschung* (1935), *La Logique de la Découverte Scientifique*, trad. do inglês (da edição de 1968) por Nicole Thipsen-Ruten e Philippe Devaux, Payot, Paris, 1973.

na verdade e refutado por Einstein (3), cuja idéia diretriz era muito próxima da exposta mais tarde por este último e conhecida sob o nome de paradoxo EPR. Aventou-se até mesmo a idéia — os raciocínios errôneos não são necessariamente os menos fecundos — de que a experiência imaginária de Popper poderia estar na origem do argumento que conduziu a enunciar este paradoxo de onde parte todo o resto (4). Propondo uma interpretação “estatística objetiva” das relações de indeterminação de Heisenberg — segundo a qual estas últimas não diriam respeito ao comportamento individual das micropartículas, mas somente às distribuições estatísticas (5) — Popper descreveu uma experiência mental que visava colocar à prova a interpretação que Bohr e Heisenberg davam a essas relações e que lhe parecia sobreposta. Esta experiência tratava da interação de duas partículas e da correlação entre os impulsos e as posições das partículas difundidas que resultava da conservação da energia-impulso na reação. Se o raciocínio de Popper é na realidade impossível de ser seguido até o fim — a medida do impulso que ele propõe modifica de fato a posição, e vice-versa —, a idéia de correlação a distância a partir de leis de conservação que aí se encontra é de uma importância decisiva.

É possível então distinguir entre si as formulações — e as abordagens — física e filosófica da mecânica quântica: é à resolução destes dois termos — tanto um como o outro necessários, mas a níveis diferentes — que este trabalho é consagrado, a respeito da inseparabilidade quântica. Esta resolução tornou-se possível graças à decantação operada pela prática do formalismo e o amadurecimento dos problemas. Nós nos propomos a seguir o traçado que conduz da idéia da correlação quântica a distância — isto é, do enunciado do paradoxo EPR — à realização dos testes experimentais da inseparabilidade quântica, após o teorema de Bell, ou seja, proceder a uma colocação em perspectiva, histórica e epistemológica, desta última. Nós nos preocuparemos em seguida com reajustar o foco

(3) — Ver Popper, op. cit., p. 240 e segs. e sobretudo pp. 246-250; e a carta de A. Einstein a Popper de 11/01/1935 publicada no apêndice desse livro, pp. 468-471.

(4) — Sobre esse ponto, ver Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley and Sons, Nova Iorque, 1974, p. 174. Na realidade essa hipótese de Max Jammer não parece muito plausível (ver a carta de Einstein a Popper, op. cit., p. 469).

(5) — Popper, op. cit., p. 228. Deve-se distinguir essa interpretação de Popper da interpretação objetiva das probabilidades desenvolvida, por exemplo, por Vladimir Fock ou Mario Bunge. Sobre esse ponto, assim como sobre outros aspectos dos problemas levantados aqui e não tratados por falta de espaço, remeto a meu trabalho em preparação, *La Matière Dérobée*, que aparecerá em tradução italiana pela Feltrinelli, Milão.

“filosófico” de nosso problema, interrogando-nos sobre a maneira de *pensar a inseparabilidade* segundo o programa de uma filosofia realista crítica que preserva a objetividade. Veremos como esta questão se relaciona, no seu ponto de fuga, à do alcance epistemológico de uma teoria quântica da medida que acreditamos poder abranger, de nossa parte, com o auxílio de uma concepção objetiva das probabilidades, e que a tomada em consideração da inseparabilidade permite delimitar.

A Idéia de Correlação a Distância no Debate entre o Realismo Determinista e a Interpretação Ortodoxa

O paradoxo levantado em 1935 por Einstein, Podolski e Rosen (paradoxo EPR) (6), que colocou em evidência o conceito especificamente quântico da não-separabilidade, situa-se numa problemática da *interpretação* da mecânica quântica — por oposição a uma problemática da construção, onde apareceram outros conceitos como o da indiscernibilidade, ou conceitos provisórios como o da dualidade onda-corpúsculo. Este traço lhe é comum com a concepção quântica da medida, com a qual está em parte relacionado. A primeira questão que se coloca de maneira evidente é, pois, a de saber se o paradoxo — e a questão da inseparabilidade que o prolonga e soluciona — é de natureza física ou epistemológica. Essa imbricação, ou confusão, se apresenta de início em razão da ausência de clareza epistemológica sobre a significação e o alcance das concepções quânticas. Tratava-se, para Einstein e seus colaboradores, de interrogar sobre a completude da teoria quântica a partir da significação das relações de Heisenberg, chamadas de incerteza ou indeterminação: estas relações exprimem a impossibilidade de se conhecer simultaneamente, para um sistema quântico, os valores de duas variáveis conjugadas tais como a posição e o impulso, ou de componentes diferentes do momento angular. Para Einstein, que reivindicava uma concepção realista e determinista da teoria física, este estado de coisas deixava manifesto o caráter insatisfatório — incompleto, mas não inexato — da mecânica quântica. O enunciado do paradoxo EPR se situa no famoso debate entre Einstein e Bohr: debate fecundo, como se sabe, e que, por esta última peripécia, deveria colocar em evidência este conceito de importância capital da teoria quântica, a inseparabilidade.

A teoria quântica não é completa, era o que proclamavam Einstein e seus colaboradores, pois ela deixa de representar todos os *ele-*

(6) — A. Einstein, B. Podolski e N. Rosen, “Pode a Descrição Mecânico-Quântica da Realidade Física ser Considerada Completa?”, *Physical Review*, 47, 1935, 777.





este reconhecimento não foi epistemologicamente neutro, e Bohr, ao fazê-lo se referia à “influência sobre as condições precisas que definem os tipos de predição que se pode fazer sobre a evolução do sistema” condições que “constituem um elemento inerente à descrição de todo fenômeno ao qual se pode validamente atribuir o qualificativo de realidade” Esta definição — bastante vaga, deve-se dizer — era ainda muito marcada pelo operacionalismo, o que equivale a dizer que o dispositivo para testar uma das quantidades conjugadas (relativa à partícula B) é incompatível com o de testar a outra (relativa à partícula A). Esta definição se inscrevia sem dificuldade na perspectiva do princípio de complementaridade e da aceção ortodoxa da noção de observação, compreendendo as condições desta última na definição das quantidades observadas.

Era então difícil, por essa razão, para os que mantinham com Einstein a necessidade de uma teoria física ser objetiva, ficar satisfeito com tal explicação. Ademais, que os dois sistemas, embora separados espacialmente por distâncias arbitrárias, não constituíssem um só todo, era difícil de aceitar por quem considerava a necessidade de caracterizar espaço-temporalmente os sistemas físicos. Mas a inseparabilidade não se dirige a uma concepção filosófica como a de Bohr. Ela comporta alguma coisa de muito mais fundamental do que a escolha epistemológica acima: tomaremos como prova — ou ao menos como índice — a evolução do pensamento de Bohr, e a sua elaboração da noção de “fenômeno quântico”, que se pode ver como uma tentativa de se desembaraçar de uma vestimenta demasiado operacionalista (11).

*Da Experiência de Pensamento à Experiência Efetiva:
O Critério de Localidade*

A experiência de pensamento que se encontra no centro do argumento EPR constituía um teste da coerência da mecânica quântica e de sua interpretação: coerência interna de seu esquema lógico, e coerência da teoria em relação ao seu objeto. Imaginando uma experiência possível em princípio, Einstein e seus colaboradores concluía uma contradição, sinal para eles de incompletude; Bohr, ao contrário, refutava esse raciocínio desde seu ponto de partida, quer dizer, recusava a legitimidade mesma da experiência proposta que lhe parecia não paradoxal, mas tautológica. O ponto sobre o qual essas duas concepções se opunham fundamentalmente, através de premissas do raciocínio, era sobre a relação da teoria física com seu objeto. Este último deve ser tal como requer o critério — que de-

(11) — Ver meu trabalho em preparação, op. cit.

fine um exemplo de realidade — invocado pelo EPR, independentemente das concepções quânticas? Trata-se, de certa maneira, de um critério absoluto? A não-separabilidade não satisfaz esse requisito, mas devido à maneira como Bohr a invocava, ela poderia parecer indissociavelmente ligada a sua própria abordagem epistemológica. Como tal, ela parecia se opor a todo programa ou perspectiva realista quanto ao papel da teoria física, e não podia ser recebida, pelos partidários de um tal programa, como uma resposta decisiva e inapelável ao argumento EPR. Foi preciso para isso que ela pudesse ser considerada como uma *propriedade objetiva* dos sistemas quânticos. O fato de que os partidários de uma perspectiva realista não a tenham assim enunciado é demonstrativo da incerteza epistemológica que prevalecia então; esta incerteza estava ligada à questão do “indeterminismo” e da dificuldade em interpretar objetivamente a função de onda(12). Bem como as respostas a este problema, a aceitação da inseparabilidade era considerada fundamentalmente como uma questão de escolha.

A descrição da experiência de pensamento não permitia — tal é a natureza deste tipo de raciocínio — nenhuma decisão independente das concepções epistemológicas adotadas. Aqueles para os quais a mecânica quântica é objeto de suspeita, por razões *notadamente* — mas não somente — ligadas às ambigüidades de interpretação, podiam se sentir seguros em persistir na sua recusa da não-separabilidade. Ao contrário, os partidários da completude — se não definitiva, pelo menos relativa aos problemas propostos — podiam, com Bohr, considerar a inseparabilidade como caracterizando legitimamente a abordagem quântica. Entre os dois, se a decantação filosófica tivesse sido efetuada, poder-se-ia pensar em considerar a inseparabilidade como uma propriedade objetiva dos sistemas quânticos; já que também uma abordagem objetiva da questão do “indeterminismo” e das probabilidades era conhecida (13). De fato, a posição mais comum quanto à inseparabilidade era a de uma simples neutralidade prática: ela funcionava dentro do formalismo, e se podia aceitá-la ou não como fundamental. A questão não parecia tão urgente, e nada parecia obrigar verdadeiramente a escolha.

(12) — A não separabilidade foi aceita no contexto do formalismo quântico e revelava epistemologicamente o mesmo estatuto deste último: quer como uma concepção do tipo positivista, quer como recusa de considerá-la como fundamental — embora aceitando-a como uma aproximação válida —, quer, de modo mais geral, como uma neutralidade prática. Implicada no formalismo, a inseparabilidade aparecia nos cálculos, independente de qualquer interpretação, e era deixada de lado no trabalho prático.

(13) — Ver por exemplo as concepções de Langevin, Fock, Popper e mais recentemente de Bunge.



mecânica quântica são contraditórias com as do determinismo local subjacente (17). Quem afirma uma contradição afirma aqui predições diferentes, e por poucas que sejam as condições experimentais disponíveis, falsificabilidades possíveis de uma ou outra predição. Por esta via, o debate sobre as correlações do EPR e da inseparabilidade deixava o terreno da pura confrontação epistemológica: uma decisão se tornou possível, independente das abordagens filosóficas, que seria imposta somente pelos fatos.

É conveniente salientar aqui o avanço considerável que representa, no debate sobre as concepções quânticas, o critério de localidade tal como Bell o enunciou. Ele permite passar de uma *experiência de pensamento* a uma experiência de *fato*, e de romper uma certa circularidade dos raciocínios invocados. Não é o meu propósito descrever aqui o estado dessa passagem, nem as difíceis e minuciosas experiências, das quais a de Aspect representa atualmente o ponto mais elaborado (18). O real tem, parece, falado e indicado uma confirmação da mecânica quântica e um questionamento da localidade nos sistemas quânticos. O que é testado pelas experiências de correlação a distância é a inseparabilidade desses sistemas: quer dizer, esta propriedade específica que Bohr havia ressaltado e que resulta do formalismo quântico no seu conjunto. Evidentemente, o aspecto epistemológico dos problemas da mecânica quântica não desapareceram devido a isto. A inseparabilidade não obriga à tradução dada por Bohr em termos da *abordagem*; o que é modificado, desde então, é a caracterização do problema em termos realistas (19): mais pro-

(17) — John S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics*, 1, 1964, 195. Bernard d'Espagnat mostrou o caráter muito geral da localidade expressa nas desigualdades de Bell, estabelecendo simplesmente desigualdades análogas no caso de exemplos imaginados (repartições estatísticas de parceiros de casais diferentes). Ver B. d'Espagnat, *A la Recherche du Réel*, Gauthier-Villars, Paris, 1979, e "Théorie Quantique et Réalité", *Pour la Science*, n.º 27, jan. 1980, p. 72.

(18) — Para revisão dessas experiências, ver M. Paty, "The Recent Attempts to Verify Quantum Mechanics" em J. Leite Lopes e M. Paty, eds., *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, Reidel, Dordrecht, 1977, p. 261; John F. Clauser e Abner Shimony, "Bell's Theorem: Experimental Test and Implications" *Reports on Progress in Physics*, 41, 1978, 1881; Alain Aspect, "Expériences Basées sur les Inégalités de Bell" em Les Implications Conceptuelles de la Physique Quantique, *Journal de Physique Supplement Colloque*, n.º 2, 1981, p. 63. A experiência de Alain Aspect (A. Aspect, "Proposed Experiment to Test the Non-separability of Quantum Mechanics", *Phys. Rev. D.*, 14, 1976, 1944) apresenta essa vantagem de ser relativa às correlações entre fótons distanciados por um intervalo (a-causal) do "gênero espaço" do "cone de luz".

(19) — Pode-se dizer, de forma à primeira vista paradoxal, que os grandes beneficiados pelo teorema de Bell e pelas experiências de correlação a distância são os partidários de uma visão realista: porque eles são de agora em diante obrigados a adotar uma concepção não ingênua do realismo.





inícios da teoria quântica. A abordagem aqui escolhida é aquela em que a mecânica quântica determina ela mesma sua *referência*; ela se esforça para não introduzir outros conceitos ou princípios além dos requeridos pelo próprio formalismo, desde que este último dê conta completamente dos fatos da experiência. Ela não aceita, pois, sem necessidade e sem crítica a introdução da noção de espaço na descrição dos fenômenos, a inseparabilidade lhe parece ser o indicador mais evidente do limite de um tal conceito. Considerando que isto tem o sentido de falar do sistema quântico tomado em si mesmo, antes de toda abordagem experimental, sublinharemos, segundo essa visão, que um sistema quântico estendido não é um sistema macroscópico, e que o espaço não é um conceito primordial da teoria quântica: sua utilização está submetida a restrições do tipo das indicadas para a não-separabilidade local. Se considerarmos, como o faz certo número de teóricos e de comentadores, que a separação local dos sistemas corresponde a uma necessidade primeira do entendimento, não se evitará a aporia das chamadas “influências instantâneas a distância”, a menos — é claro — que nos atenhamos às teses epistemológicas da escola de Copenhague, que parecem apresentar evidentes fraquezas filosóficas, e que são, em todo caso, incompatíveis com um programa realista em matéria de teoria física.

Falar de “influências” a distância entre as duas partículas ou subsistemas da experiência de correlação apresenta, na verdade, uma dificuldade lógica do simples ponto de vista da consideração do formalismo. Este último, com efeito, impede que se designe e pense separadamente os subsistemas correlacionados do sistema considerado. A idéia de influência a distância, mesmo se considerarmos que se trata de “influências não físicas”, subentende que os subsistemas em questão são conceitualmente distintos e separados espacialmente, o que é contraditório com a primeira proposição. Uma tal idéia corresponde então à introdução de uma noção *ad hoc*, que não tem contrapartida clara nem na realidade física nem no formalismo: ela é, portanto, estritamente supérflua. É verdade que se tenta, ao invocá-la, reconciliar o que a abstração do formalismo pode parecer apresentar de estranho ao entendimento, e as exigências do senso comum pelas quais se gostaria de caracterizar este último. De uma maneira geral, a idéia de “influência a distância” funciona, no caso que nos ocupa, como uma noção introduzida do exterior para ajustar o conceito de *inseparabilidade*, seja às teorias específicas sobrepostas — tal é o caso dos movimentos estocásticos supraluminosos de um éter covariante de Dirac, considerados por J. P. Vigiér (22) —, seja às concepções filosóficas que a priori a aceitam mal; um ter-

(22) — Ver a exposição de Jean-Pierre Vigiér neste mesmo “*Colloque Popper*” de Cerisy/1981.

ceiro caso é aquele em que, ao contrário, se aceita a inseparabilidade, não sendo invocada a idéia de “influência instantânea” a não ser para confrontá-la com as concepções anteriores, por exemplo, com aquelas que se supõe resultar da exigência de “realismo físico” (23).

Concluir, da evidência experimental para a inseparabilidade — a das experiências de correlação a distância —, a existência indubitável de influências ou de propagações superlumínicas ou instantâneas, parece-me tão arbitrário quanto poderia ser, relativamente às experiências de Michelson e Morley, a dedução de uma contração física na direção do movimento em relação ao éter. Mostrar-se-á, neste último caso, com a teoria da relatividade de Einstein, que esta contração não era mais do que uma propriedade cinemática, isto é, uma consequência lógica da nova conceituação do espaço e do tempo. Do mesmo modo, a inseparabilidade quântica não é uma propriedade de natureza dinâmica, mas resulta da definição dos sistemas ou dos objetos quânticos, no seio mesmo da teoria.

Convém, entretanto, notar que a idéia de uma influência, mesmo não física é compreendida num sentido puramente matemático ou no de uma comodidade conceitual —, é bastante significativa para um aspecto do problema das correlações que nos resta discutir: fazendo referência a uma *ação* entre os dois sistemas, ou sobre eles, ela conduz implicitamente ao ato de observação ou de medida. Se invocamos, com efeito, uma influência entre os sistemas, é porque concebemos seus estados como sendo determinados somente a partir do instante mesmo da medida. A idéia de influência exprimiria assim a remanescência do paradoxo sob a dissolução aparente à qual ele tinha sido conduzido pelo formalismo quântico: e esta parte enigmática, que subsiste sob a transparência das relações e das proposições do formalismo, provém da incerteza em que ainda estamos sobre a significação das operações de medida.

Antes de tratar deste último problema, precisamos sublinhar um ponto, sem dúvida alguma fundamental, que liga ainda a inseparabilidade e a completude ou não da teoria quântica: mas a completude é para ser entendida desta vez no sentido de fechamento. É que a inseparabilidade, no sentido da não-localidade, se apresenta a nós agora como o lugar irreduzível da diferença — quer dizer, da ausên-

(23) — B. d’Espagnat, *A la Recherche du Réel*, op. cit. O “realismo físico” tal como entende d’Espagnat e ao qual, segundo ele, é necessário renunciar em favor de um “realismo velado” é mais próximo do realismo (metafísico) clássico que do realismo crítico que é aqui defendido (e que pode, certamente, ser considerado igualmente como uma posição metafísica, mas que se define melhor como um “programa filosófico sobre o conhecimento” e dá uma autonomia muito maior à física).

cia de relações conceituais e axiomáticas — entre a mecânica quântica e a relatividade. Muito haveria que dizer sobre isso e eu não faço mais do que mencioná-lo. Os desenvolvimentos aos quais o conceito de inseparabilidade deu lugar esclareceram como este conceito não revelava uma dificuldade *interna* da mecânica quântica; mas ele, de certo, indica a dificuldade de sua fusão fundamental e com a relatividade. O que nos lembra evidentemente as considerações de Einstein, mas, como veremos, sob uma luz um pouco distinta.

A Inseparabilidade e o Problema da Medida

Nós tentamos dar conta da inseparabilidade numa abordagem objetiva (correspondente a um programa filosófico realista sobre o conhecimento). Resta-nos esclarecer um aspecto importante. Na perspectiva que escolhemos, ele é secundário, porque não concerne aos sistemas em si mesmos, mas a sua observação, e esta, como sabemos, permanece ainda para muitos como a maior dificuldade da abordagem objetiva. Podemos ver isto no caso que nos ocupa: para estudar as propriedades dos sistemas quânticos estendidos, e primeiramente para estabelecer sua inseparabilidade, é preciso proceder a operações de observação e medida.

Segundo a concepção tradicional, é no momento da medida que “a potencialidade” de uma partícula ou de um sistema estar num dado estado se realiza. Se retomarmos o exemplo da molécula separada em dois átomos, será necessário concluir que somente neste instante a quantidade considerada para um dos dois átomos assume o valor dado. Seria então necessário admitir que o mesmo se passa para a outra, mas sem medida, já que se trata de um só sistema. A mecânica quântica não coloca a questão da distância que separa os dois átomos que constituem este sistema; mas a medida a coloca, e faz assim reaparecer o paradoxo que acreditávamos dissolvido ao nível da consideração dos sistemas, pois, se medirmos simultaneamente as quantidades correspondentes (spin) relativas a cada átomo, a correlação observada não será mais somente a das partes de um microssistema, mas a de dois instrumentos macroscópicos de medida. A questão da transmissão de um sinal é por estes colocada, mesmo que a possibilidade física tenha sido eliminada por um dispositivo do tipo utilizado na experiência de Aspect.

Notemos que esse ressurgimento do paradoxo está ligado a uma concepção bem precisa da medida no sentido quântico. É então, no final das contas, ao problema da medida que somos reconduzidos, problema que pode ser formulado assim: qual é a relação entre o sistema quântico e o aparelho de medida que faz com que *tal resultado* seja obtido? O problema é o da *redução* (do pacote de ondas). Ele

comporta também um aspecto epistemológico e um aspecto físico, que não são distintos na concepção da escola de Copenhague — contido na teoria de von Neumann e em abordagens mais recentes como a teoria ergódica de Daneri, Loinger e Prosperi (24) —, que apela para a necessidade, a fim de dar conta dos fenômenos quânticos, de conceitos e aparelhos clássicos. Distinguir estes dois aspectos, ao contrário, pode conduzir à possibilidade de uma descrição objetiva, isto é, puramente quântica, do processo de medida, na qual o aparelho não intervém *fundamentalmente*, a não ser como um sistema que interage com o sistema estudado (a amplificação ergódica no aparelho macroscópico sendo efetuada somente após uma redução eventual).

Eu não me proponho aqui, bem entendido, a resolver o problema da teoria da medida. O que me interessa é ver se a significação filosófica de uma teoria quântica da medida pode se ligar à questão das correlações a distância entre os sistemas quânticos ou entre os aparelhos de medida. Se existe uma solução satisfatória do ponto de vista objetivo, ela deve ser procurada na direção em que a consideração da interação dos sistemas quânticos — o que está em estudo e o que representa o aparelho — basta ao problema.

A direção que parece mais apropriada é evidentemente aquela em que se considera que não há redução, ou seja, que não é no momento da interação do sistema estudado e do aparelho que o estado do sistema se determina, e que a medida somente transcreve — através de cascatas de interações sucessivas — a informação sobre o estado inicial. Tal é a posição de Margenau insistindo sobre a existência, entre o sistema considerado em si mesmo e o instrumento de medida, do dispositivo de preparação dos estados (25) através do qual tem lugar a determinação do estado do sistema. Esta interpretação é completada pela aceitação do caráter objetivo das probabilidades afetadas a cada estado de superposição — tal é a posição de Bunge (26). Se, fazendo nossa esta concepção, voltamos à consideração da correlação entre os dois subsistemas, ela deixa de parecer paradoxal. Ela não se efetua, com efeito, no momento da medida, seja de um, seja de outro, seja dos dois subsistemas simultaneamente, numa pretensa “atualização das potencialidades do sistema” Ela é de natureza muito clássica, pois estava determinada desde a cisão do

(24) — A. Daveri, A. Lainger e G. M. Prosperi, “Quantum Theory of Measurement and Ergodicity Conditions” *Nuclear Physics*, 33, 1962, 297.

(25) — Henry Margenau, *Physics and Philosophy, Selected Essays*, Reidel, Dordrecht, 1978, p. 203, 207.

(26) — Ver, por exemplo, Mario Bunge, *Foundations of Physics*, Springer-Verlag, Berlim, 1967; *Philosophy of Physics*, Reidel, Dordrecht, 1973, trad. francesa por F. Balibar, *Philosophie de la Physique*, Seuil, Paris, 1975.



Se a consideração da medida é assim tributária da inseparabilidade, isto põe um termo, do nosso ponto de vista, à lógica do raciocínio. Com efeito, a compreensão dos fatos experimentais de correlação a distância dos sistemas quânticos, fatos dos quais dá conta o conceito de inseparabilidade, parece depender ainda de uma teoria da medida, devido ao papel dos aparelhos na definição do estado do sistema. Se a medida conduz, como na concepção do estado relativo, à inseparabilidade, isto significa que ela não acrescenta nada à determinação dos sistemas, e que é justamente, sem paradoxo nem influência instantânea, com relação a estes sistemas quânticos considerados em si mesmos que as correlações devem ser compreendidas.

Tradução revisada de Maria Beatriz Ducati