Parte II - Implicações filosóficas da teoria quântica

Bohr e o problema da medição: uma solução dualista?

Stefano Osnaghi

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Bohr e o problema da medição: uma solução dualista?#

Stefano Osnaghi

1. Introdução

A ideia de que a visão de Bohr sobre a Física é fundamentalmente dualista é muito comum, sendo transmitida pela exposição dos livros-textos ortodoxos, os quais enfatizam que “[...] para obter-se uma maneira de interpretar a função de onda [quântica], devemos [...], de início, postular um nível clássico de forma que os resultados obtidos de uma medida possam ser compreendidos” (BOHM, 1951, p. 626). Geralmente, considera-se que a Mecânica Quântica não pode dar conta da própria ocorrência de resultados bem definidos, a não ser assumindo um processo de “redução” do vetor de estado. De acordo com o postulado de projeção, quando uma observação for realizada, o estado de um sistema é suposto “colapsar” (num auto-estado da observável medida), em aparente contraposição com a evolução contínua governada pela equação de Schrödinger. Segundo uma interpretação bastante comum, defendida, por exemplo, por John Bell (2004, p. 217-219), “postular um nível clássico”, ou seja, restringir o domínio de aplicabilidade da física quântica governada pela equação de Schrödinger a sistemas microscópicos fechados, seria a maneira excogitada por Bohr para dar conta da redução do vetor de estado dentro de um quadro teórico logicamente coerente, embora ontologicamente dualista. Uma vez que, como o próprio Bohr assinalou, a existência de resultados definidos é uma pré-condição para se realizar experimentos quânticos, e uma vez que sem a redução do estado parece não haver resultados definidos, o dualismo de Bohr é, então, geralmente considerado como uma tentativa (não bem sucedida) de se resolver um problema de consistência.

Traduzido por Gustavo Rocha, revisado pelo autor.

Esta leitura é o ponto inicial de inúmeros programas de pesquisa que almejam “ir além” da abordagem de Bohr ao provar a consistência da Teoria Quântica, sem se basear em hipóteses dualistas. Um exemplo típico é dado pelo programa que pretende explicar, por meio da “descoerência” induzida pelo ambiente, as características clássicas do fenômeno macroscópico, incluindo a ocorrência de resultados de medida definidos (ver, por exemplo, ZUREK, 2003). Admito, é claro, a importância do estudo experimental e teórico dos sistemas quânticos macroscópicos. Ademais, concordo que, a fim de se fornecer uma visão consistente das teorias e do conhecimento científico, a abordagem de Bohr precisa ser elaborada e completada. Não obstante, sustento que seja enganosa a ideia de que esta tarefa possa ser atingida ao se delinear uma explicação quântica do processo de medida. A ideia de que uma tal explicação, pelo fato de preencher o fosso entre os domínios de experiência quânticos e clássicos, permitiria que nos livrássomos dos postulados dualistas de Bohr está equivocada por várias razões. Uma delas é que, como este artigo pretende demonstrar, não há postulados dualistas na abordagem de Bohr.

Na próxima seção, delinearei o cenário do problema, sintetizando as alegações de dualismo que são geralmente dirigidas contra o ponto de vista de Bohr. Em seguida, argumentarei que estas alegações, provenientes de um entendimento equivocado das ideias de Bohr, não são justificadas. Farei isto em três etapas. Em primeiro lugar, recordarei, brevemente, as próprias observações de Bohr sobre a medição. Em segundo lugar, analisarei sua definição muito precisa do que seja um vetor de estado, e as implicações de longo alcance desta definição. Em terceiro lugar, mostrarei que, baseado nesta definição, a abordagem de Bohr não implica em, ou necessita de, nenhuma das características dualistas que a ela geralmente é atribuída. Em particular, ela não proíbe o tratamento quântico dos sistemas macroscópicos e dos processos de medida e, portanto, não entra em discordância com as tentativas de se estender a Mecânica Quântica aos fenômenos que envolvem sistemas macroscópicos. Segue-se disto que estas tentativas não deveriam ser consideradas como *alternativas* à análise de Bohr. Igualmente, argumentarei, elas não fornecem, independentemente desta mesma análise, uma *prova* da consistência da Mecânica Quântica. A minha conclusão será que o “dualismo” implícito na abordagem de Bohr nos leva, simplesmente, a reconhecer a existência de diferentes modos de descrição da experiência (o formalismo quântico, a mecânica clássica, a linguagem ordinária...), cada um dos quais, insinuarei, é mais bem interpretado como um modo de *predição* e é bem definido dentro de uma “prática” específica. Nada impede que se estenda o domínio de aplicabilidade de um ou outro modo, contanto que a prática correspondente, que permite associar-se um significado físico inequívoco aos símbolos e às expressões linguísticas, seja ampliada também de maneira apropriada.

Finalmente, uma última observação. A minha análise sobre o desentendimento ao redor das ideias de Bohr ressoará as conclusões de alguns estudos recentes (ver FAYE, 2008). Contudo, meu objetivo, neste artigo, não será contrastar com uma exegese precisa dos escritos de Bohr o que considero ser uma interpretação equivocada das ideias dele. Ao invés disto, tentarei responder diretamente às críticas levantadas contra a abordagem de Bohr, atacando, explicitamente, os diferentes aspectos do conhecido problema da medição e esboçando, de modo que a abordagem de Bohr possa ser enquadrada de maneira coerente, um referencial epistemológico não-dualista. Esta resposta reflete a *minha* elaboração do ponto de vista de Bohr, baseada numa leitura pragmática que se foca na noção de preditividade, isto é, capacidade de predição. Embora acredite que esta elaboração esteja de acordo com as intuições filosóficas mais fundamentais de Bohr, não lidarei aqui com o problema de estabelecer se ela oferece uma interpretação historicamente consistente da doutrina bohriana da complementaridade.

2. Medição e alegações de dualismo

O problema da medição está conexo com o chamado colapso da função de onda, o qual se supõe que ocorra quando se realiza uma observação, em contraste com a evolução contínua de um sistema fechado. Para poder ser considerada uma teoria completa, a Mecânica Quântica deveria dar conta de todos os fatores que desempenham algum papel no processo de medição (o qual pode ser entendido como apenas um tipo particular de interação física). O colapso da função de onda é tipicamente explicado pelo ato intencional de um observador consciente ou pelo caráter macroscópico do aparelho de medida. Então, dependendo da explicação do colapso adotada, a Mecânica Quântica deveria oferecer um modelo físico da mente, ou uma justificação do fato de que o aparelho de medida, e de maneira geral os objetos macroscópicos, não são encontrados numa superposição dos estados que correspondem às suas configurações “clássicas” (em contraposição ao famoso gato de Schrödinger).

O colapso da função de onda é considerado frequentemente como um “processo ‘mágico’ no qual alguma coisa bem drástica” acontece, “enquanto em todas as demais ocasiões supomos que os sistemas obedeçam a leis contínuas perfeitamente naturais.” (Everett a Jammer, 1973, citado por OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 105) Quer se concorde ou não que este “processo mágico” caracteriza de forma justa “o aspecto estridente da Mecânica Quântica de Bohr” (ROVELLI, 1996, p. 1671), não surpreende que, quando entendido desta maneira, o postulado da projeção levante preocupações a respeito da consistência da teoria (ver, por exemplo, HEISENBERG, 1955, p. 23). Isto é ilustrado pelo experimento de pensamento (*Gedankenexperiment*) do amigo de Wigner (1961), no qual um

observador O_2 realiza uma medida sobre outro observador O_1 , o qual, por sua vez, mede um sistema S . Se supusermos que O_1 e S formam um sistema fechado, O_2 descreverá a situação de O_1 e S através do estado emaranhado resultante da evolução contínua do conjunto O_1 e S . Contudo, uma vez que O_1 tenha realizado a sua medida de S , encontrando, por exemplo, o valor x para a observável medida, o postulado da projeção determina que o seu estado se colapsará no estado correspondente à configuração clássica “ter observado x ”. Isto parece nos levar a um paradoxo, a menos que estejamos preparados para, por um lado, endossar o “solipsismo” (ao tomarmos a descrição de O_2 como a única válida, implicando que O_1 e todos os demais observadores não têm um estado definido, apesar de afirmarem o contrário), ou para, por outro, postular que a interação do sistema com uma mente consciente é o que acarreta o colapso do seu estado (neste caso, a descrição correta seria que o relato de O_2 sobre O_1 seria incompleto, uma vez que este não consegue levar em consideração a mudança objetiva no estado do mundo provocada pela observação de O_1). Tanto autores que, no debate entre as décadas de 1960 e 1970, defenderam a hipótese da influência da mente sobre o mundo físico (WIGNER, 1961), quanto os que recusaram esta solução (POPPER, 1967), fizeram-no a partir do convencimento de que “a doutrina de Copenhague [era] logicamente inconsistente, e que esta falha deriva[va] da adoção por ela de uma filosofia subjetivista” (BUNGE, 1973, p. 89).

Contudo, embora ocasionalmente, a acusação de “idealismo” ou aquela de consentir uma influência do observador sobre o mundo físico tenham sido dirigidas contra Bohr (ver a discussão em HOWARD, 2004, e CAMILLERI, 2009), a atitude mais comum entre os críticos é argumentar que, a fim de *evitar* qualquer referência ao observador, Bohr endossa um tipo diferente de dualismo. Deste modo, como vimos na introdução, o aspecto geralmente considerado como a característica distintiva da abordagem de Bohr é a sua restrição da aplicabilidade da Teoria Quântica somente ao âmbito do mundo atômico (BELL, 2004, p. 188-189). Segundo Rovelli (1996, p. 1671), por exemplo, “o aspecto perturbador do ponto de vista de Bohr é a inaplicabilidade da Teoria Quântica ao mundo macroscópico”. Para ele, a visão de Bohr implica que “o mundo clássico é fisicamente distinto dos sistemas microscópicos” e que devemos tratar “uma porção do mundo de maneira diferente do resto dele”. Na concepção de Zurek (2003, p. 716), “a solução de Bohr era delinear uma fronteira entre o quântico e o clássico e manter determinados objetos – especialmente os instrumentos de medida e os observadores – ao lado do clássico”. Desta maneira, “o princípio de superposição” era suspenso por “decreto” no domínio clássico. Para Omnès (1992, p. 340-341), estas mesmas características implicam que “a interpretação de Copenhague é incompleta, a sua consistência é muito questionável, e o seu tratamento do fenômeno é bastante superficial” (tendo em vista nossa discussão subsequente, é importante notar que Omnès (1992, p. 340-341) apresenta a sua abordagem

como “o tipo de progresso necessário para se obter uma versão satisfatória da interpretação de Copenhagen”).

A crença de que a abordagem de Bohr postula que “os sistemas macroscópicos são relativamente imunes aos efeitos quânticos”, o que implicaria que “mesmo em princípio a Mecânica Quântica não pode descrever o processo da própria medição”, é uma das razões pelas quais Hugh Everett, ainda estudante de doutorado, começou a desenvolver uma abordagem alternativa à Mecânica Quântica, que resultou na sua formulação dos “estados relativos” (EVERETT, 1957). Sabemos, a partir das cartas de Everett, que ele considerava a abordagem de Bohr “desesperadamente incompleta” e “um tanto quanto repugnante, uma vez que ela [levava] a uma dicotomia artificial do universo entre fenômenos ordinários e medições”. Além disto, segundo Everett, tal abordagem “adere[ia] a um conceito de ‘realidade’ no nível clássico, enquanto renuncia[ava] o mesmo no domínio quântico”. Isto parecia para ele uma “monstruosidade filosófica” (EVERETT, 1955, p. 3; OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 105-106, 113).

Na tese de Everett, a abordagem de Bohr é associada a um ponto de vista mais sofisticado, o qual Everett chama de formulação do “observador externo” da Mecânica Quântica. Nas palavras de Bas van Fraassen, esta formulação resulta em assumir que

[...] a Teoria Quântica fora desenvolvida para se descrever somente situações nas quais um observador (ou pelo menos o ambiente da medida) esteja envolvido, ao mesmo tempo em que deixa esta parte fora da descrição. (FRAASSEN, 1991, p. 273)

Uma observação importante é a seguinte: nesta visão “qualquer sistema pode ser parte do sistema sob estudo, mas a linha entre o sistema sob estudo e o aparelho de medida (final) deve ser traçada em algum lugar” (FRAASSEN, 1972, p. 332). A descrição do ponto de vista de Copenhagen nos termos da formulação do “observador externo” é provavelmente devida a John Wheeler. Orientador de Everett, e um dos inspiradores dos estudos sobre os fundamentos da Mecânica Quântica nas décadas de 1970 e 1980, Wheeler era um bohriano dedicado. Para ele, o objetivo da proposta de Everett não era “questionar” a abordagem ortodoxa do problema da medição, “mas aceitá-la e generalizá-la” (Wheeler para Stern, 1956, citado em OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 97). Entretanto, embora em comentário publicado junto com a tese de Everett, Wheeler (1957) afirmasse que a formulação do “observador externo” tinha “o grande mérito” de ser dualista, ele admitiu sucessivamente que o fato de ela “dividir o mundo em dois” levantava uma dificuldade que o perturbava profundamente (WHEELER, 2000, p. 269). Durante suas discussões com Bohr, na década de 50, Wheeler havia levantado este ponto, dizendo que ele estava preocupado, principalmente, com a

[...] questão fundamental, a saber, se há qualquer escapatória a um formalismo como o de Everett, quando se deseja lidar com uma situação onde vários observadores são considerados e, ainda, incluir os próprios observadores no sistema a ser considerado na análise matemática. (Wheeler para Bohr, 1956, citado em OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 119).

A resposta do próprio Everett a esta questão era, é claro, negativa. Como ele enfatizou, a formulação da “observação externa” chegava a problemas críticos “no caso de um universo fechado”, já que neste caso “não há lugar a se posicionar fora do sistema para observá-lo. Não há nada fora dele para produzir transições de um estado a outro” (EVERETT, 1957, p. 142).

A leitura que identifica a interpretação de Copenhagen com a formulação do “observador externo” continua sendo popular, assim como as preocupações a respeito da completeza e da consistência da visão de Bohr que tal leitura suscita. Deste modo, van Fraassen (1991, p. 273), por exemplo, argumenta que, na abordagem de Bohr, “uma medição, ao deixar para fora alguma ou outra coisa, é uma interação descrita de maneira incompleta”. Na sua “variante de Copenhagen” da interpretação modal, ele se dispõe a “completar” a abordagem de Bohr ao fornecer uma caracterização completa e objetiva das interações que contam como medições, eliminando, desta maneira, todas as “conotações antropocêntricas” e tornando possível “pensar a Teoria Quântica como uma descrição autônoma putativa do mundo em termos físicos neutros” (FRAASSEN, 1991, p. 284; ver OSNAGHI, 2008, para discussão).

Para concluir esta seção, vale a pena sintetizar esquematicamente os aspectos da abordagem de Bohr que, nas interpretações mais comuns, implicam em algum tipo de dualismo (ver FAYE, 2008):

1. O colapso da função de onda quando se realiza uma observação, em oposição à evolução continua de um sistema fechado.
2. A necessidade de se levar em consideração processos extrafísicos (envolvendo, por exemplo, a consciência) ao se descrever a física da observação.
3. A existência de uma divisão física entre os fenômenos atômicos, governados pela física quântica, e o mundo macroscópico, governado pela física clássica.
4. A necessidade de manter as interações que constituem uma medição fora do alcance da Mecânica Quântica.

3. Bohr sobre o “problema observacional”:

As caracterizações dualistas do ponto de vista de Bohr e as questões relacionadas a respeito de sua completeza são justificadas? As passagens dos escritos de Bohr que lidam com aspectos do que hoje é chamado de “problema da medição” não são exatamente cristalinas (TELLER, 1981; MURDOCH, 1987; BITBOL, 1996). Mesmo assim, não há dúvida de que Bohr estava convencido de que a sua abordagem não enfrentava qualquer problema específico com relação à medição. Caso se aceitasse o uso “da palavra *fenômeno* exclusivamente para referir às observações obtidas sob circunstâncias específicas, incluindo uma descrição de todo o arranjo experimental”, então, o “problema observacional” estaria

[...] livre de qualquer complicação especial, uma vez que, em experimentos reais, todas as observações são expressas por afirmações inequívocas com relação, por exemplo, ao registro do ponto aonde um elétron chega numa chapa fotográfica. (BOHR, 1963, p. 64).

Numa conferência de 1938, Bohr foi explicitamente chamado a comentar a respeito do postulado da projeção. Segundo as atas, ele respondeu que “a dualidade que ele encontrava na interpretação do formalismo da mecânica quântica era, em sua opinião, uma questão de se escolher a descrição mais adequada do experimento”. Ele também observou que

[...] se decidirmos incluir na enumeração das condições exteriores todos os instrumentos que devam ser utilizados para o estudo do fenômeno como um todo, o único fator arbitrário remanescente será [...] a livre escolha destas condições experimentais, e, para além desta liberdade, a interpretação da solução do problema, no que diz respeito às predições relativas ao fenômeno que estamos estudando, será perfeitamente inequívoca. (BOHR, 1998, p. 107).

A resposta de Bohr ao artigo EPR foca no papel “constitutivo” do contexto da medição na definição da “realidade física”. Ela contém afirmações que parecem aludir à necessidade de um “corte” na sequência de interações que constituem uma medição, embora estas afirmações, na verdade, pretendam enfatizar a necessidade de uma *definição objetiva* do contexto da medição. Bohr (1935, p. 701), por exemplo, enfatiza a

[...] necessidade de, em cada arranjo experimental, se discriminar entre aquelas partes do sistema físico em questão que serão tratadas como instrumentos de medida, daquelas que constituem os objetos sob investigação [...],

e observa que esta necessidade “realmente, deve-se dizer, forma uma distinção *fundamental entre as descrições, clássica e quanto-mecânica, do fenômeno físico*”. Da mesma forma, em outro momento, ele enfatiza

[] a necessidade de se descrever inteiramente em termos clássicos todos os instrumentos de medidas que, ao fim e a cabo, definem as condições externas do fenômeno, e, portanto, a necessidade de mantê-los fora do sistema, para o qual o tratamento do quantum de ação está, essencialmente, sendo levado em consideração. (BOHR, 1998, p. 104).

Contudo, ele também acentua, enfaticamente, que “é possível, é claro, que no sistema, em que é aplicado o formalismo da mecânica quântica, se inclua qualquer agente auxiliar intermediário empregado no processo da medida” (BOHR, 1998, p. 104). Estas afirmações podem parecer ambíguas. Por um lado, Bohr defende que o instrumento de medida deve, *necessariamente*, ser descrito classicamente. Por outro, ele reivindica que o instrumento de medida pode ser parte daquilo que, em outra passagem, chama de “sistema objeto” num experimento. Todavia, a contradição aqui é somente aparente, como se tornará claro na medida em que as afirmações precedentes forem entendidas à luz da interpretação bohriana do formalismo.

4. A interpretação instrumentalista do formalismo

Segundo Bohr (1948, p. 314),

[...] todo o formalismo [da Teoria Quântica] deve ser considerado como uma ferramenta para se derivar previsões, de caráter determinista ou estatístico, com relação às informações obteníveis de acordo com as condições experimentais descritas [...] em linguagem ordinária adequadamente refinada pelo vocabulário da física clássica.

Esta e outras afirmações similares são frequentemente consideradas como um pouco mais do que slogans instrumentalistas, cujo ponto principal é enfatizar as limitações epistêmicas da Mecânica Quântica quando comparada com as teorias clássicas. Acredito que, pelo contrário, elas oferecem uma concepção *positiva* e precisa das teorias físicas, que pretende generalizar (mais do que restringir) o “ponto de vista habitual da filosofia natural” (BOHR, 1935, p. 697). Para o propósito de minha discussão, chamarei este “ponto de vista habitual” de “ponto de vista representacionalista”. De maneira aproximada, este pode ser caracterizado como o ponto de vista que supõe que o fenômeno, e, portanto, nossas observações

e os resultados de nossas medidas, seja produzido pelas propriedades de objetos cujas características não dependem da forma como investigamos a experiência. Dentro do ponto de vista representacionalista, espera-se que as teorias, em última análise, descrevam estes objetos e suas interações. Nesta perspectiva, é natural imaginar-se que o vetor de estado de um sistema reflita, mais ou menos diretamente, as propriedades objetivas do sistema, ou seja, seu “estado físico” (ver, por exemplo, EVERETT, 1973, p. 63).

A interpretação de Bohr do formalismo não pressupõe esta estrutura referencial. Ela não contém referência, seja direta ou indireta, a *propriedades*. As predições se referem a *resultados*, com nenhuma alusão implícita a algo supostamente “revelado” por eles. Isto tem duas consequências cruciais. Primeiro, as afirmações empíricas são intrinsecamente condicionais, uma vez que elas se referem ao que ocorrerá se uma medida for levada a cabo. Segundo, uma vez que os símbolos matemáticos da teoria se referem unicamente às medidas, o uso significativo de uma teoria pressupõe que se possa definir de maneira inequívoca o arranjo experimental no qual as medidas são realizadas, assim como seus possíveis resultados (BOHR, 1963, p. 5). Deste modo, se assumimos a interpretação de Bohr do formalismo, tanto a possibilidade de se definir, quanto a de se comunicar de maneira inequívoca as condições sob as quais um experimento é realizado, é condição prévia para se dotar de significado físico os modelos formais (ver BOHR, 1935, p. 700). Esta condição não deveria ser vista como uma restrição externa imposta sobre a Física. Muito pelo contrário, de um ponto de vista pragmático, ela expressa claramente uma condição de possibilidade da Física, ou seja, uma condição cujo cumprimento está implícito em qualquer atividade experimental desenvolvida dentro de um quadro teórico bem definido (STAPP, 1972; PARK, 1973; MURDOCH, 1987; BIBTOL, 1996).

5. O dualismo revisitado

Mantendo em mente a interpretação do formalismo acima, não é difícil perceber que a abordagem de Bohr não é dualista no sentido que caracterizam as leituras mais comuns. Estas leituras refletem um esforço mal conduzido para se levar em consideração, dentro do ponto de vista representacionalista, a natureza inerentemente pragmática dos modelos quânticos e, mais especificamente, o fato que, na medida em que estes se relacionam com os dados empíricos, os modelos pressupõem um contexto de medição bem definido.

Colapso da função de onda versus evolução contínua. Suponha que a observável A de algum sistema S seja medida por um aparelho “ M_1 ” e então que a medida seja repetida imediatamente por um segundo aparelho “ M_2 ” (aspas indicam que

estamos nos referindo a um objeto da experiência ordinária, não ao seu correlato putativo dentro de algum modelo quântico). Como podemos ter certeza de que o resultado encontrado na primeira medida será confirmado na segunda? E se não podemos ter certeza, como podemos afirmar que os resultados de uma medição de A são “estáveis” e, então, objetivos?

Vamos enfatizar antes de tudo que, segundo a visão de Bohr, no caso de uma medição repetida, estamos lidando com *dois* experimentos diferentes (na medida em que um experimento se identifica com uma medição realizada). Ao final do primeiro experimento, o estado de S é, em geral, uma superposição de auto-estados de A , enquanto no início do segundo experimento, ele é o autoestado, correspondendo ao resultado encontrado na primeira medição. O problema, então, é o seguinte: como é que a abordagem instrumentalista pode justificar o fato de que o vetor de estado adequado para prever os resultados do segundo experimento é precisamente aquele determinado pelo resultado do primeiro? O postulado de projeção fornece uma resposta formal a esta pergunta. Contudo, segundo a definição de Bohr, é sem sentido (rigorosamente falando) dizer que o vetor de estado de S sofreu um colapso. Uma vez que o vetor de estado é definido somente dentro de *um* contexto experimental, não estamos tratando aqui da evolução de um vetor de estado, mas sim conectando os vetores de estado referentes a *dois* experimentos diferentes.

Obviamente, se considerarmos um contesto experimental “mais amplo”, é possível elaborar uma descrição física da repetição da medida, e analisar o que acontece, de acordo com esta descrição, *entre* os dois experimentos. Nesse caso, um modelo governado pela equação de Schrödinger pode dar conta, em princípio, de todos os aspectos empíricos do problema. Por outro lado, a própria definição de um tal modelo (que deve incluir, além de S , os sistemas M_1 e M_2 que representam os dois aparelhos “ M_1 ” e “ M_2 ”) *pressupõe* que seja possível atribuir um vetor de estado a S , o que, por sua vez, requer que os resultados das medições efetuadas sobre S sejam bem definidos. Se assumirmos que a estabilidade seja um elemento constitutivo dos resultados, esta última condição *determina* a própria construção do modelo (ou seja, as definições operacionais que tornam possível a identificação dos sistemas M_1 e M_2 com os aparelhos “ M_1 ” e “ M_2 ”) e não pode então ser *derivada* dele. Em outros termos, a legitimidade do modelo “*qua* modelo de medida repetida” é garantida contanto que não se pretenda testar a “objetividade” dos resultados das medidas que o modelo é suposto representar.

As conclusões da análise precedente podem ser resumidas e generalizadas da seguinte maneira. Enquanto for confinada ao domínio das asserções empiricamente testáveis, a análise dos processos de constituição da objetividade, que tornam possível a criação e o uso de modelos preditivos, não requer o postulado de projeção. Assumindo a interpretação de Bohr, a Mecânica Quântica governada

pela equação de Schrödinger é suficiente para dar conta das situações experimentais encontradas na análise de tais processos. Por outro lado, nenhum modelo desse tipo pode fornecer uma *prova* de que as condições de objetividade pressupostas pela Física são efetivamente realizadas, pela simples razão que qualquer prova desse tipo deveria assumir o que ela pretende provar.

Dissolução do dualismo mente-matéria. Uma vez que na visão de Bohr não há colapso da função de onda, não há, *a fortiori*, nenhuma necessidade de se postular que o colapso seja causado pela mente do observador. Poder-se-ia argumentar que atribuir um vetor de estado ao sistema depois de uma medida, o que é a maneira como o colapso deveria ser entendido na visão de Bohr, implica um ato consciente. Mas isto não envolve nenhuma ação da consciência sobre os sistemas físicos. Como Bohr enfatizou, a descrição do fenômeno atômico tem “um caráter perfeitamente objetivo, uma vez que nenhuma referência explícita é feita a qualquer observador individual” (BOHR, 1963, p. 3; ver também HOWARD, 2004). A questão é simplesmente que, uma vez que os vetores de estado são símbolos que servem para antecipar os resultados obtidos num contexto bem definido, se o contexto passa por uma mudança objetiva, como acontece depois que um resultado é registrado, o mesmo acontece ao vetor de estado a ser usado para prever os resultados das observações posteriores. Claro que para poder falar de mudança objetiva no contexto, temos que pressupor a possibilidade de um acordo intersubjetivo sobre a ocorrência de um resultado (CHEVALLEY, 1995). Contudo, como este pressuposto expressa uma condição pragmática de possibilidade da Física (na medida em que ela pode prever resultados), ele não necessita (nem pode) ser explicado por algum mecanismo *físico*, como o colapso da função de onda. Negar esta necessidade, sem por outro lado adotar uma doutrina idealista, é uma postura perfeitamente coerente com o ponto de vista de Bohr sobre o formalismo.

Ao levarmos em consideração estas observações, podemos perceber facilmente – na linha de raciocínio do argumento supracitado com relação à redução do estado – que o paradoxo do amigo de Wigner se dissolve. Pois, se adotarmos a abordagem operacional acima delineada, as descrições dos dois observadores, no exemplo de Wigner, não se referem mais a dois “pontos de vistas” mutuamente incompatíveis sobre o *mesmo evento*. Mais propriamente, eles se referem a duas *situações experimentais diferentes*. Poder-se-ia insistir que estas duas situações podem ser vistas como parte de uma única situação e que é então legítimo perguntar se os relatos dos dois observadores coincidem. Contudo, assumindo a interpretação instrumentalista do formalismo, a resposta a esta pergunta deve e pode ser decidida através de um experimento, em que ambos os observadores são considerados parte do “sistema objeto”, ou seja, são considerados dentro de um metacontexto, no qual a questão a respeito de seus supostos desentendimentos possa ser resolvida através de medições bem definidas. Obviamente, este meta-modelo não deixaria de *pressupor* a possibilidade de um acordo intersubjetivo.

Medições versus interações ordinárias. Como notamos, nos escritos de Bohr há passagens que parecem insinuar a necessidade de se introduzir um “corte” na descrição física, a fim de manter a parte final do processo de medição do lado clássico (MURDOCH, 1987, cap. 5). Mesmo estudiosos que podem ser contados entre os simpatizantes de Bohr identificaram a sua visão com a formulação do “observador externo”. Contudo, hoje sabemos que esta caracterização foi decididamente rejeitada pelo grupo de Copenhague (OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 119). Léon Rosenfeld, por exemplo, um dos colaboradores mais próximos de Bohr, reconhecia, como “perfeitamente trivial”, o fato de “que seja realmente possível arranjar uma função de onda para o aparelho experimental e o Hamiltoniano para a interação entre o sistema e o aparelho”. Mas, por ser trivial, este fato não deixava, segundo ele, de ser também “terrivelmente traiçoeiro” (Rosenfeld a Bergmann, 1959, citado por OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 119). Esta atitude é confirmada por vários documentos, que mostram que, na década de 50, o grupo de Copenhague considerava profundamente enganosa toda a ideia de se construir uma Teoria Quântica da medida ao estilo de von Neumann (OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009).

Do ponto de vista de Bohr, o que a descrição objetiva de um experimento precisa é de uma distinção funcional entre os instrumentos de medida e o “sistema objeto” (MURDOCH, 1987, p. 97-98). Nada impede que seja estipulado um modelo de interação física que corresponda a uma medição. Não obstante, se S é o sistema físico que representa o “sistema medido” e M é o sistema físico que representa o “aparelho da medição”, os vetores de estado presentes neste modelo adquirem significado somente quando se declara o conjunto das medições, capazes de serem realizadas sobre o sistema composto $S + M$. Isto exige que se defina, operacionalmente, as observáveis do sistema composto e que se especifique, precisamente, o arranjo experimental em que estas observáveis podem ser medidas. Claramente, esta situação é diferente daquela na qual o aparelho funciona como um aparelho. No último caso, o aparelho é um objeto da experiência ordinária ao qual se aplicam os predicados usuais da linguagem ordinária. Por outro lado, no primeiro caso, o aparelho é um sistema quântico, ou seja, um conjunto de graus de liberdade para os quais se aplicam os protocolos experimentais da Física Quântica.

Dado que, numa perspectiva não representacionista, um sistema é identificado, operacionalmente, com as medições que sobre ele possam ser realizadas, e dado que estas medições são diferentes nos dois casos, está longe de ser óbvio que o sistema quântico M pode efetivamente ser identificado com o aparelho clássico “ M ”. Todavia, esta identificação pode ser construída fazendo as práticas relevantes convergirem, a fim de assegurar que nosso modelo seja coerente, por um lado, com a Teoria Quântica e sua prática experimental, e, por outro, com o quadro conceitual e os fatos da experiência cotidiana (OSNAGHI, 2009; comparar com FRAASSEN, 2008, cap. 5). Claramente, este processo construtivo

pressupõe um quadro conceitual e pragmático que funcione como referencial semântico. Consequentemente, a tentativa de se incluir o contexto experimental na descrição teórica de um experimento pode ser considerada como algo mais do que um mero exercício formal, na medida em que ela se apóia num contexto muito mais amplo.

Uma vez que se concorde com este ponto, todo elemento da sequência de sistemas que interagem em um processo de medição, incluindo o próprio observador, pode ser modelado e considerado como um “sistema objeto” de algum experimento. Pode-se até incluir no modelo *todos* observadores imagináveis, contanto que se dê uma definição operacional inequívoca ao termo “todos”, que o conecte a quantidades observáveis. Porém, fora da perspectiva representacionista, a fim de que este modelo “universal” tenha sentido, precisamos descrever os contextos experimentais para os quais suas previsões se referem. Isto não pode ser feito a não ser de uma maneira que seja objetiva *para nós*, por exemplo, utilizando os termos “inequívocos” da linguagem ordinária, cujo conteúdo disposicional é reconhecível e testável por qualquer locutor competente. Portanto, falar sobre um “corte” nos parece somente uma forma pictórica, e enganosa, de se referir ao fato de que os modelos devam ser colocados num contexto experimental concreto e que este contexto deva ser passível de descrição objetiva.

Dissolução do dualismo micro-macro. Na visão de Bohr, o uso de um modelo teórico pressupõe que se possa definir de maneira inequívoca o arranjo experimental no qual as medidas são realizadas. Portanto, a exigência de que o arranjo experimental seja descrito em termos clássicos (ou seja, utilizando-se linguagem ordinária suplementada com o vocabulário da Física clássica) reflete a necessidade de se satisfazer estas condições de comunicabilidade (MURDOCH, 1987, p. 99-100). De maneira alguma isto nos leva a uma suposição *física* de que os sistemas macroscópicos se comportam classicamente. Nada nos impede de produzir um modelo quântico de um sistema macroscópico. Contudo, como vimos no caso dos aparelhos de medida, a questão se tal modelo representa “realmente” um determinado objeto ordinário pode ser resolvida somente pela prática.

Para ilustrar estas ideias, vamos considerar o exemplo tradicional do gato que, na situação imaginária proposta por Schrödinger (1935), ficaria suspenso entre a vida e a morte em consequência da sua interação com um sistema atômico preparado em um estado metastável. A fim de definir operacionalmente a observável *O*, cujos valores correspondem ao estado biológico do gato (vivo ou morto), podemos proceder de duas maneiras.

- a) Podemos associar ao estado biológico um conjunto de medições quânticas com seus possíveis resultados (ou seja, protocolos operacionais bem definidos dentro da prática da física atômica). Na prática, como se viu, isto ocorre através de um processo construtivo, cujo objetivo é

assegurar uma transição “suave” entre os procedimentos experimentais quânticos e as observações ordinárias. Pois que a definição operacional da observável O envolve graus de liberdade quânticos, nesse processo ficam automaticamente definidas também as observáveis incompatíveis com O . Então, uma vez que esta construção tenha sido realizada, o fato de que gatos possam ser preparados numa superposição de dois *vetores de estado*, correspondendo a “morto” e “vivo” respectivamente, e que se possa observar os efeitos de interferência correspondentes, aparece sem nenhuma surpresa. Esta observação mostra apenas que a construção foi bem sucedida.

- b) Alternativamente, podemos substituir os predicados “morto” e “vivo” por uns vetores de estado e definir operacionalmente estes vetores de estado através do conteúdo disposicional que aqueles predicados têm dentro da experiência ordinária. Posto isto, então, qual seria o significado operacional de uma “superposição” destes estados? Na experiência ordinária não há nenhuma observável que nos permita distinguir entre uma superposição e uma mistura estatística destes dois estados. Logo, em contraste com o caso anterior, mas também sem surpresa, desta vez não observaremos efeitos de interferência. (Esta conclusão se aplica também ao caso em que, por exemplo, estivéssemos considerando uma observável como a posição do gato. Claro que, em física atômica, existem observáveis incompatíveis com a posição, como por exemplo, o momento. Mas se consideramos unicamente os protocolos de medida da experiência ordinária, o momento do gato *não* é uma observável incompatível com a sua posição).

Note-se que, à luz destas considerações, a afirmação de que gatos “não podem ser encontrados” numa superposição $|V\rangle + |M\rangle$ dos estados que correspondem à vida e à morte é bastante enganosa. Pois, dependendo do modo como se define, operacionalmente, estes estados, ou não faz algum sentido operacional afirmar que o estado do gato é $|V\rangle + |M\rangle$ (o que é o nosso caso b), ou faz sentido sim (como no caso a), mas então é falsa a afirmativa de que o gato não pode ser encontrado em $|V\rangle + |M\rangle$.

O raciocínio que leva ao paradoxo descrito por Schrödinger é baseado em hipóteses representacionalistas que identificam, de maneira não problemática, o objeto-gato do discurso ordinário com um sistema quântico, e as propriedades do primeiro com os vetores de estado do segundo (como na opção b acima). De acordo com estas hipóteses, a situação descrita por Schrödinger parece paradoxal pela razão seguinte. As propriedades “estar vivo” e “estar morto” são supostas associadas a alguns vetores de estado quânticos. Por outro lado, em contextos experimentais muito particulares, é possível preparar superposições desses

vetores de estado. Isto parece implicar que deveria existir alguma propriedade do gato que corresponderia a uma sobreposição de vida e morte. E, uma vez que esta propriedade pode ser atribuída ao gato num contexto específico, é legítimo perguntar-se o que significaria o gato *ter* esta propriedade em geral. Este exemplo poderia eventualmente ser utilizado para argumentar-se que, se a Mecânica Quântica se estendesse aos objetos macroscópicos e às suas propriedades, isto determinaria um problema de consistência porque não ficaria claro como definir de maneira objetiva os contextos experimentais que, de acordo com a interpretação instrumentalista, permitem atribuir significado ao simbolismo.

A questão aparece muito diferente do ponto de vista instrumentalista. Para este, o que determina o significado tanto da descrição quântica quanto da descrição ordinária, não é o referente putativo delas, mas sim as implicações preditivas que as caracterizam dentro do respectivo domínio de experiência. O problema é então se a rede de fatos e observáveis que constituem a experiência ordinária como um todo pode ser localmente “reduzida” à rede de fatos e operações que constituem a experiência quântica, onde, por “redução”, deve-se entender homomorfismo de conteúdos preditivos da primeira com alguma sobestrutura da segunda (se um “fato da experiência ordinária” F implica os fatos da experiência ordinária $F_1, F_2, \dots$ com probabilidades $p_1, p_2, \dots$, então o “fato da experiência quântica” Fq , que corresponde a F , deve implicar os fatos da experiência quântica $Fq_1, Fq_2, \dots$, que correspondem a $F_1, F_2, \dots$, com as mesmas probabilidades $p_1, p_2, \dots$). Se esta redução é ou não possível é um problema que só pode ser resolvido *na prática*, ou seja, através do processo construtivo descrito acima (opção *a*), para o qual a hipótese reducionista funciona como um princípio regulador. É através deste processo que é possível criar as condições pragmáticas que permitem interpretar determinados conjuntos de operações quânticas e ordinárias como manipulações do *mesmo* objeto.

6. A Física Quântica e a experiência ordinária

A noção de “domínio de experiência”, que tenho utilizado para indicar um conjunto estruturado de observáveis operacionalmente definidas, precisaria sem dúvida de uma análise bem mais detalhada, que não pode ser desenvolvida aqui. A ideia geral, todavia, é que os domínios de experiência podem, em primeira aproximação, ser vistos como redes autoconsistentes de fatos e predições. Neste esquema, a objetividade de um fato é assegurada pelas implicações preditivas que o conectam de maneira suficientemente unívoca a um conjunto suficientemente amplo de outros fatos da rede. Assim, por exemplo, um fato da experiência ordinária é que o meu gato estava ontem no sofá, enquanto um fato da física atômica é que o átomo que eu detectei agora estava excitado. A segunda afirmação não

denota algum fato objetivo dentro da experiência ordinária, pois na experiência ordinária as observáveis que precisariam ser medidas para confirmá-la não estão definidas. De maneira similar, a primeira afirmação não denota, *a priori*, algum fato objetivo dentro da prática da física atômica.

A ênfase na dimensão construtiva, tanto dos modelos teóricos quanto dos correlativos fatos empíricos, permite entender a existência de domínios de experiência distintos, sem que seja preciso postular alguma descontinuidade espaço-temporal (ligada, por exemplo, ao tamanho dos sistemas considerados, ou à sua evolução). Entretanto, uma vez que a estrutura fenomenal tem sido liberada de todo vínculo ontológico, não fica muito claro *porque* deveriam existir domínios de experiência distintos. Por exemplo, se a definição das observáveis e dos fatos da Física clássica é o resultado de um processo essencialmente construtivo, como é possível que, ao interior do quadro pragmático-fatual clássico, apareçam uns fenômenos, tais como os fenômenos “atômicos”, que *não* se deixam absorver por ele?

Uma resposta possível é que precisamente o fato de não assumir uma ligação direta entre observáveis, resultados e propriedades “objetivas” elimina toda garantia *a priori* de que seja possível “salvar” a coerência interna de uma estrutura preditiva de fatos e observáveis, quando esta estrutura for se estendendo a situações cada vez mais complexas. Pois, fora do esquema representacionista, a coerência da rede preditiva dos resultados não pode mais “se apoiar” na coerência interna do conjunto estruturado das propriedades dos objetos medidos, a qual é por sua vez garantida (independentemente da complexidade e da novidade das situações consideradas) pela própria *existência* destes objetos (na medida em que a existência implica na possibilidade lógica). A doutrina bohriana da complementaridade pode ser vista como uma maneira de lidar precisamente com esta situação, enfatizando as suas raízes pragmáticas (FRANK, 1946; PETERSEN, 1985).

Por razões similares, a justificação *a priori* dos programas reducionistas inspirados na visão atomista perde plausibilidade. Nenhuma ordem intrínseca da estrutura ontológica do mundo parece garantir que a experiência ordinária possa ser descrita por meio dos modelos (supostamente mais fundamentais) da física atômica.

Na perspectiva não representacionista, então, os programas reducionistas aparecem desvinculados de todo suporte metafísico. Por outro lado, eles estão livres das dificuldades que este suporte comporta quando se lida com fenômenos quânticos. De um ponto de vista pragmático, nada impede de estabelecer uma “hierarquia” entre os diferentes domínios de experiência e de tentar “reduzir” todos eles a um único domínio considerado mais fundamental. A circunstância crucial para tornar praticável esta tentativa é que as estruturas preditivas utilizadas dentro do domínio quântico *generalizam* os modelos preditivos dados

pela linguagem ordinária e pela Física clássica (ver, por exemplo, FRAASSEN, 1991; BITBOL, 1996). É pelo fato desta condição ser satisfeita que o processo construtivo descrito na seção precedente, a respeito do gato de Schrödinger, pode efetivamente ser desenvolvido com sucesso, como mostrado explicitamente pelos programas de estudo experimental da descorência (ver, por exemplo, HAROCHE et al. 1997; HACKERMULLER et al., 2005).

É claro, por outro lado, que, na perspectiva pragmática, o sucesso do programa reducionista não autorizaria de maneira nenhuma a afirmar que o caráter intrinsecamente condicional das afirmações empíricas pode ser eliminado. Qualquer descrição quântica do universo, independentemente da sua capacidade de abranger todo sistema concebível, inclusive os próprios observadores, não deixa de pressupor um referencial pragmático e conceitual, e de incorporar uma referência implícita às operações de medida realizáveis por um observador. Pois a objetividade de uma descrição física depende destes pressupostos e não poderia ser definida fazendo abstração deles.

Estas considerações ajudam a entender a bem conhecida relutância de Bohr em introduzir conceitos novos e, supostamente, mais fundamentais para lidar com o fenômeno atômico (MURDOCH, 1987, p. 100-102; OSNAGHI; FREITAS; FREIRE JR., 2009, p. 116-118). O que esta atitude reflete, eu creio, é a preocupação de que a lição epistemológica da Mecânica Quântica seria obscurecida, ao invés de iluminada, por esta operação (FAYE, 1991; CAMILLERI, 2007). O alegado “conservadorismo” de Bohr a esse respeito não deveria, portanto, ser confundido com uma oposição de princípio aos programas reducionistas. Simplesmente, se adotarmos o ponto de vista dele, o objetivo mais fundamental que estes programas têm perseguido - a saber, substituir a abordagem instrumentalista por uma descrição “autônoma e objetiva” do mundo, na qual as condições pragmáticas que tornam possível o uso dos modelos físicos seriam automaticamente satisfeitas devido a alguma característica “emergente” do universo quântico - parece repousar numa ilusão.

Certamente, dizer isto não implica que as ideias de Bohr e a interpretação particular sobre elas que esbocei neste artigo não necessitam de maior investigação, uma vez que a consistência das mesmas está baseada numa teoria pragmática do significado e do conhecimento que está, obviamente, longe de ser bem estabelecida (BITBOL, 2001). Não levantei estes aspectos aqui. O meu propósito foi salientar que as tentativas de se enquadrar a abordagem de Bohr numa visão representacionista das teorias, e então buscar uma solução física para os paradoxos que estas tentativas acarretam, não é, provavelmente, a maneira mais apropriada de proceder. A abordagem de Bohr assume, ainda que implicitamente, uma teoria pragmática do significado e do conhecimento. E me parece que todas as questões relacionadas com a sua completeza deveriam ser colocadas neste referencial,

muito embora, é claro, isto requeira um trabalho filosófico bem maior do que aquele envolvido na construção de uma Teoria Quântica da observação.

Agradecimentos:

Este trabalho foi apoiado pelo Programa da *Templeton Research Fellows* “Projeto de Cooperação entre Físicos e Filósofos sobre a Natureza da Realidade Quântica” no Instituto de Informação e Óptica Quântica de Viena da Academia Austríaca de Ciências. Eu sou grato a Anton Zeilinger e seu grupo pelo apoio e pelas discussões estimulantes e proveitosas.

Referências

BELL, J. S. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University, 2004.

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

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

BOHM, D. *Quantum theory*. New York: Prentice-Hall, 1951.

BOHR, N. Causality and complementarity: supplementary papers. In: J. FAYE, J.; FOLSE, H. (Ed.). *The philosophical writings of Niels Bohr*, Wooldbridge (CT): Ox Bow, 1998. v. 4.

_____. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, v. 48, p. 696-702, 1935.

_____. *Essays 1958–1962 on atomic physics and human knowledge*. New York: Interscience, 1963.

_____. On the notions of causality and complementarity. *Dialectica*, v. 2, p. 312-319, 1948.

BUNGE, M. *Philosophy of physics*. Dordrecht: Reidel, 1973.

CAMILLERI, K. Constructing the myth of the Copenhagen interpretation. *Perspectives on Science*, v. 17, p. 26-57, 2009.

_____. Indeterminacy and the limits of classical concepts: the transformation of Heisenberg's thought. *Perspectives on Science*, v. 15, p. 178-201, 2007.

CHEVALLEY, C. On objectivity as intersubjective Agreement. In: KRUGER, L.; FALKENBURG, B. (Ed.). *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaften*. Heidelberg: Spektrum Akademischer, 1995. p. 333-346.

EVERETT, H. Objective vs subjective probability. *Everett papers*, Maryland, USA, Niels Bohr Library, Center for History of Physics, American Institute of Physics, College Park, Box 1, Folder 6, 1955.

_____. 'Relative State' formulation of quantum mechanics. *Review of Modern Physics*, v. 29, n. 3, p. 454-462, 1957. Reimpresso em WHEELER, J. A.; ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University, 1983. p. 315-323.

_____. The theory of the universal wave function. In: DEWITT, B. S.; GRAHAM, N. (Ed.). *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton: Princeton University, 1973. p. 3-140.

FAYE, J. Copenhagen interpretation of quantum mechanics. *The Stanford encyclopedia of philosophy*, 2008. Edição de E. N. Zalta. Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-copenhagen/>>.

_____. *Niels Bohr, his heritage and legacy: an anti-realist view of quantum mechanics*. Dordrecht: Kluwer, 1991.

FRANK, P. Foundations of physics. *International Encyclopedia of Unified Sciences*, Chicago: University of Chicago, n. 7, v. 1, 1946.

FRAASSEN, B. C. van. A formal approach to the philosophy of science. In: COLODNY, R. (Ed.). *Paradigms and paradoxes: the philosophical Challenge of the Quantum Domain*. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1972. p. 303-366.

_____. *Quantum Mechanics: an empiricist view*. Oxford: Oxford University, 1991.

_____. *Scientific representation*. Oxford: Oxford University, 2008.

HACKERMULLER, L. et al. Coherence and decoherence experiments with fullerenes. In: AKULIN, V. M. et al. (Ed.). *Decoherence, entanglement and information protection in complex quantum systems*. Dordrecht: Springer, 2005. p. 329-352.

HAROCHE, S.; BRUNE, M.; RAIMOND, J. M. Experiments with single atoms in a cavity: entanglement, Schrödinger's cats and decoherence. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A355, p. 2367-2380, 1997.

HEISENBERG, W. The development of the interpretation of the quantum theory. In: PAULI, W. (Ed.). *Niels Bohr and the development of physics*. London: Pergamon, 1955. p. 12-29

HOWARD, D. Who invented the 'Copenhagen interpretation'? A study in mythology, *Philosophy of Science*, v. 71, p. 669-682, 2004.

MURDOCH, D. *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University, 1987.

OMNÈS, R. Consistent interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, v. 64, p. 339-382, 1992.

OSNAGHI, S. The entangled roots of objective knowledge. In: BITBOL, M.; PETITOT, J.; KERSZBERG, P. (Ed.). *Constituting objectivity: transcendental approaches of modern physics*. Berlin: Springer, 2009. p. 359-374.

_____. Van Fraassen, Everett and the critique of the Copenhagen view of measurement. *Principia*, v. 12, n. 2, p. 155-175, 2008.

_____.; FREITAS, F.; FREIRE JR., O. The origin of the Everettian heresy. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, p. 97-123, 2009.

PARK, J. L. The self-contradictory foundations of formalistic quantum measurement Theories. *International Journal of Theoretical Studies*, v. 8, p. 211-218, 1973.

PETERSEN, A. The philosophy of Niels Bohr. In: FRENCH, A. P.; KENNEDY, P. J. (Ed.). *Niels Bohr, a centenary volume*. Cambridge, MA: Harvard University, 1985. p. 299-310.

POPPER, K. Quantum mechanics without 'the observer'. In: BUNGE, M. (Ed.). *Quantum theory and reality*. New York: Springer, 1967. p. 1-12.

ROVELLI, C. Relational quantum mechanics. **International Journal of Theoretical Physics**, v. 35, p. 1637-1678, 1996.

SCHRÖDINGER, E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, v. 23, p. 807-812, 823-828, 844-849, 1935.

STAPP, H. P. The Copenhagen interpretation. *American Journal of Physics*, v. 40, p. 1098-1116, 1972.

TELLER, P. The projection postulate and Bohr's interpretation of quantum mechanics. In: ASQUITH, A. P.; GIERE, R. (Ed.). *PSA 1980: proceedings of the 1980 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. East Lansing: Philosophy of Science Foundation, Michigan State University, 1981. v. 11, p. 201-223.

WHEELER, J. A. Assessment of Everett's 'Relative State' formulation of quantum theory. *Review of Modern Physics*, v. 29, p. 463-465, 1957. Reimpresso em WHEELER, J. A.; ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University, 1983.

_____. *Geons, black holes and quantum foam*. With K. W. Ford. New York: Norton, 2000.

WIGNER, E. P. Remarks on the mind-body question. In: GOOD, I. J. (Ed.). *The scientist speculates*. London: Heinemann, 1961. p. 284-302. Reimpresso em WHEELER, J. A.; ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University, 1983.

ZUREK, W. H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, v. 75n *Physics*, 75: 715-775.