

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# PUBLICAÇÕES

INSTITUTO DE FÍSICA  
CAIXA POSTAL 20516  
01452-990 SÃO PAULO - SP  
BRASIL

IFUSP/P-1095

*Numero: 2171788*

DAVID BOHM, SUA ESTADIA NO BRASIL E  
A TEORIA QUÂNTICA

O. Freire Jr., M. Paty, A.L. da Rocha Barros  
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Dezembro/1993

## DAVID BOHM, SUA ESTADIA NO BRASIL E A TEORIA QUÂNTICA

O. FREIRE Jr.  
M. PATY  
A.L. da ROCHA BARROS

Há quarenta anos o físico David Bohm (1917-1992), nascido norte-americano, em Wilkes-Barre (Pénnsylvania), elaborou o trabalho intitulado "Uma proposta de interpretação da teoria quântica em termos de 'variáveis escondidas'"<sup>1</sup>, que marcou a história das interpretações desta teoria. Com este trabalho buscava uma descrição "causal e objetiva" para os fenômenos quânticos. Quando o trabalho foi publicado ele encontrava-se no Brasil trabalhando na USP, onde permaneceu de outubro de 1951 a janeiro de 1955.

Atingido pelo "Mac Carthysm" pouco antes da elaboração do artigo, Bohm perdeu toda condição de trabalhar nos EUA. Por isto ele veio para o Brasil, no período da recepção, pela comunidade científica, e do desenvolvimento de seu trabalho.

Para a física brasileira foi também o período da consolidação institucional da pesquisa. Bohm colaborou neste processo, ministrando cursos, proferindo seminários, escrevendo sobre a física, e o ensino, no Brasil e interagindo com físicos brasileiros em função do desenvolvimento de seu programa científico.

A obra científica e filosófica de David Bohm tem sensibilizado variados círculos da cultura contemporânea. O seu súbito desaparecimento, em Londres, 27 de outubro de 1992, nos enseja rever a sua estadia no Brasil, episódio aliás pouco conhecido mesmo na literatura especializada da história da ciência, e também a proposta de reinterpretação da teoria quântica, incluindo a acolhida da proposta por cientistas como A. Einstein, W. Pauli e L. de Broglie, bem como desenvolvimentos desta proposta e discussões correlatas, realizadas no Brasil com cientistas como J.P. Vigié, R. Schiller, J. Tiomno, M. Schenberg, W. Schützer, L. Rosenfeld, M. Bunge e R. Feynman.

### I - A vinda de Bohm para o Brasil.

David Bohm obteve doutoramento em física, em 1943, na Universidade da Califórnia, em Berkeley, sob orientação de R. Oppenheimer. A partir de 1946 passou a ensinar na Universidade de Princeton. Publicou uma série de artigos em variados temas da física, em

1. D. BOHM - A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables, I and II - *Physical Review*, 85(2), 1952, 166-179 e 180-193.

especial sobre oscilações do plasma.<sup>2</sup> Escreveu em seguida o livro "Quantum Theory",<sup>3</sup> considerado até hoje um clássico no assunto. Aprofundou o interesse pelos fundamentos da teoria quântica elaborando artigos reinterpretando-a. Antes da publicação desses artigos circunstâncias políticas, alheias à sua vontade, forçaram-no a sair dos Estados Unidos.

David Bohm foi uma das vítimas do denominado período do "Mac Carthysm" na história dos Estados Unidos.<sup>4</sup> Em 1949 a Comissão de Atividades Anti-Americanas do Congresso, dos EUA, dirigiu sua atenção para os físicos que haviam trabalhado no Berkeley Radiation Laboratory, durante a guerra, entre os quais Joseph Weinberg, Giovanni Lomanitz e David Bohm.<sup>5</sup> Inquirido se era membro do Partido Comunista ou se conhecia Steve Nelson (líder comunista americano), Bohm invocou, em um gesto de coragem política, a Quinta Emenda da Constituição americana para recusar-se a responder, argumentando que se o fizesse estaria submetendo outras pessoas e a si próprio a perseguições. Foi então acusado de desacato ao Congresso mas ganhou na Justiça o direito de manter tal posição. Contudo perdeu o cargo na Universidade de Princeton e qualquer chance de continuar trabalhando nos EUA. A saída daquele país foi então a condição para dar continuidade à sua atividade científica, assegurando também sua integridade física.<sup>6</sup>

Para viabilizar a vinda para o Brasil contou principalmente com o empenho do físico brasileiro Mário Schenberg, e também com o apoio de Abrahão de Moraes, Leite Lopes e Jaime Tiomno, estando os dois últimos em Princeton. Contou também com o amigo Albert Einstein, que escreveu para o próprio Abrahão de Moraes, então Chefe do Depto. de Física da USP, para o Presidente Getúlio Vargas e para o Governador do Estado, Lucas

2. Ver M. JAMMER - David Bohm and His Work - On the Occasion of His Seventieth Birthday, *Foundations of Physics*, 18(7), 1988, 691-99.

3. D. BOHM - *Quantum Theory*, Prentice Hall, New York, 1951. Reimpresso pela DOVER, 1989.

4. A expressão Macarthismo não dá conta das restrições às liberdades políticas ocorridas nos Estados Unidos, nos governos Truman e Eisenhower, sob o pretexto da "ameaça comunista". O Senador Joseph McCarthy foi um personagem menor neste contexto, conforme sustenta Argemiro Ferreira. Note-se que David Bohm foi chamado a depor em 1949 e o Senador McCarthy só entrou na campanha anti-comunista em 1950. Da literatura, bastante diversificada, sobre o período registramos, em língua portuguesa, o livro de Argemiro Ferreira - *Caca às Bruxas - Macartismo: uma tragédia americana*, L&PM, Porto Alegre, 1989, que dispõe de razoável referência bibliográfica.

5. Conforme relato de Jessica Wang - *Science, Security, and the Cold War - The Case of E. U. Condon*, *ISIS*, 83, 1992, 238-289, especialmente p.257.

6. J. Wang sustenta que "cientistas fizeram dramáticas declarações contra as políticas de segurança da Guerra Fria mas, como grupo, não estabeleceram políticas efetivas para defender cientistas individualmente ou desafiar as premissas do estado de segurança nacional". Ver J. WANG, *Science, Security, and the Cold War*, op.cit., p.240.

Garcez.<sup>7</sup> Bohm veio acompanhado de seu colaborador Ralph Schiller, atualmente na Syracuse University, nos Estados Unidos.

Na Universidade de São Paulo foi nomeado Professor da Cátedra de Física Teórica e Física Matemática, anteriormente ocupada por Gleb Wataghin, permanecendo de outubro de 1951 a janeiro de 1955. É digno de registro que apesar da conjuntura política brasileira do pós II Guerra ter sido influenciada pela Guerra Fria, especialmente durante o governo Dutra (cassação de mandatos parlamentares, do registro do Partido Comunista e repressão a sindicatos), a sociedade brasileira foi capaz de acolher e manter um cidadão e cientista perseguido politicamente em seu país de origem.

Bohm chegou ao Brasil em uma fase de consolidação institucional da pesquisa em física. A primeira instituição brasileira na área, o Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP, tinha pouco mais de 15 anos de existência. Em 1949 foi criado o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) no Rio de Janeiro, voltado exclusivamente para a pesquisa em física, em 1951, o Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ), como órgão federal de incentivo à pesquisa, e em São Paulo, ainda em 1951, foi fundado, o Instituto de Física Teórica como instituição independente da USP.<sup>8</sup>

Neste período a presença de físicos estrangeiros foi significativa. Além de Bohm, na USP, aqui estiveram R.P. Feynman, C.N. Yang, E.P. Wigner e L. Rosenfeld, no CBPF, C.F. von Weizsacker, R. Oehme, H. Joos, M. Taketani e Y. Katayama no IFT. Já se tinha formado, contudo, uma geração de físicos brasileiros que estava em plena atividade de pesquisa: Schenberg, Damy, Sala, em São Paulo e Leite Lopes, Lattes e Tiomno no Rio de Janeiro, entre outros.<sup>9</sup> No início da década de 50 a física brasileira adquiriu inclusive uma visibilidade social mais ampla devido à larga repercussão na imprensa da descoberta do méson "pi" - partícula elementar - por César Lattes, junto com Powell e Occhialini.

7. Carta de A. Einstein a A. de Moraes, 24.05.1952 e cartas de A. Einstein a Getúlio Vargas e Lucas Nogueira Garcez, 24.05.1952 (Aos cuidados de A. de Moraes), e também carta de A. de Moraes a A. Einstein, 12.05.1952.

8. Ainda neste contexto, da institucionalização da física brasileira, o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) mobilizou professores como R. Feynman para cursos de atualização de professores de física. Entre os alunos estavam J. Israel Vargas e Beatriz Alvarenga

9. Para a história deste período da institucionalização da pesquisa em física ver J. COSTA RIBEIRO - A física no Brasil, em F. de AZEVEDO - *As Ciências no Brasil*, 2 vols, Ed. Melhoramentos, Rio de Janeiro, 1955, V. I, pp. 163-202; S. MOTOYAMA - A Física no Brasil, in M.G. FERRI e S. MOTOYAMA - *História das Ciências no Brasil*, 3 vols, EPU/EDUSP, São Paulo, 1979, v.I, 61-91. e S. SCWARTZMAN - A formação da comunidade científica no Brasil, Cia. Editora Nacional, Rio de Janeiro, 1979, pp.285-290.

Era portanto ambiente favorável à presença de um físico de projeção, como Bohm, com uma proposta que propiciava controvérsia na comunidade científica internacional. Ele declarou, em 1983: "Quando fui para o Brasil, estava trabalhando numa nova interpretação da teoria dos Quanta, que encerrei agora. Tendo terminado minha pesquisa sobre plasma, estava pensando em seguir mais além, pois estava muito interessado na questão filosófica. Acho que minha ida para o Brasil me deu oportunidade de prosseguir essa discussão, primeiro com Tiomno e Schiller, depois com Walter Schützer e, também, com Mário Schenberg - tudo isso me interessou muito, no sentido de ajudar a dar prosseguimento a meu trabalho."<sup>10</sup>

David Bohm ministrou, em português, o curso de Física Teórica durante o ano de 1953 e o de Mecânica Quântica em 1954. As notas do primeiro curso foram objeto de uma publicação interna<sup>11</sup> com o título "Curso de Física Teórica". Entre os alunos estavam Newton Bernardes, Moyses Nussenzveig, Ernst W. Hamburger, Amélia Império, Gerhard Bund e Ewa Cybulska, todos hoje físicos e professores.

Preocupado com a formação da física brasileira elaborou análise comparativa sobre a física e o ensino, no Brasil e nos EUA.<sup>12</sup> Observou, criticamente, tendências nos estudantes brasileiros de desprezo ao trabalho manual, concentração em assuntos matemáticos avançados e crença de que a física desenvolve-se por atos de genialidade.

Manifestou também preocupação com o descaso do governo brasileiro para com a educação superior. Esta preocupação, transmitida a Einstein, motivou a seguinte observação sobre a situação brasileira: "O que mais me espanta é o governo brasileiro não fazer nenhuma tentativa séria para tornar os altos estudos mais atraentes. Porque isso é uma necessidade absoluta para o desenvolvimento técnico do país. Compare, por exemplo, como o Japão agiu no século XIX"<sup>13</sup>

Embora sua estadia tenha sido um período de intensa atividade científica e didática, não foi um período de tranqüilidade pessoal. Bohm nutria o desejo de que modificações na situação política permitissem o retorno ao seu país. A carta escrita para Einstein, em fevereiro de 1954, testemunha as insatisfações. A principal delas é com a instabilidade política

10. D. BOHM - O aparente e o oculto - Entrevista a A.L. da Rocha Barros, *Estudos Avançados*, 4(8), 1990, 188-198. (Entrevista realizada em Londres, 8.03.1983).

11. D. BOHM - *Curso de Física Teórica*, 2 vols., redigidas por Paulo Saraiva Toledo, USP, São Paulo, 1952.

12. D. BOHM - Comparação entre a Física no Brasil e nos Estados Unidos, *Notas de Matemática e Física*, USP n. 1, 1953, 11-28.

13. A. EINSTEIN - Carta a D. Bohm, 25.01.1954, *CIÊNCIA HOJE*, 15(90), 1993, 44-47.

de sua situação no Brasil. Ele diz "... Já circulam rumores de que sou comunista...", e que "os Estados Unidos poderiam também solicitar ao governo brasileiro a minha extradição. Ninguém aqui pode prever qual seria a reação do governo brasileiro se recebesse essa solicitação ...". Tais dificuldades são agravadas "... porque enfrento agora uma espécie de impasse no meu trabalho, e preciso relaxar da tensão e do desalento resultantes."<sup>14</sup> Este desabafo revela também a aguda consciência que Bohm tinha das dificuldades, que examinaremos mais adiante, associadas ao desenvolvimento de seu trabalho.

A perspicácia e a atualidade das observações de Bohm sobre a realidade brasileira chegaram a despertar a atenção da mídia, quando de sua recente divulgação.<sup>15</sup> Mas esta carta é notável também pelo pessimismo quanto às interações profissionais e sociais no Brasil. Este depoimento não é consistente com as discussões e trabalhos aqui realizados nem com seus depoimentos ulteriores sobre a estadia no Brasil. Destoa também dos testemunhos de pessoas que desfrutaram do seu convívio neste período. A explicação para o tom da carta deve ser buscada, a nosso ver, no agravamento da instabilidade da sua situação política. No ano anterior Julius e Ethel Rosenberg foram executados na cadeira elétrica, nos Estados Unidos, nos desdobramentos dos acontecimentos políticos que vitimaram Bohm.<sup>16</sup> O final de 1953 e o ano de 1954 foram também os meses do auge da histeria do "Mac Carthysm".<sup>17</sup> É possível portanto que ele tenha agravado a descrição das dificuldades aqui vivenciadas visando convencer Einstein a apoiar a ida para Israel, onde acreditava estar mais seguro. A plausibilidade deste argumento fica reforçada se observarmos que neste período Einstein buscava convencer Bohm a permanecer no Brasil e obter cidadania brasileira, ao tempo que desaconselhava a ida para Israel.<sup>18</sup>

O contrato com a USP foi renovado a partir de setembro de 1954 por mais três anos, em decreto do Governador Lucas Garcez. Mas Bohm já havia decidido ir para Israel, tendo obtido através de N. Rosen um

14. D. BOHM - Carta a A. Einstein, 3.02.1954. Para a íntegra da carta ver *CIÊNCIA HOJE*, 15(90), 1993, 44-47.

15. Por exemplo: FOLHA DE SÃO PAULO, 11.07.1993, p.6-14 e ESTADO DE SÃO PAULO, 10.07.1993, p.14.

16. Judith Liebllich Patarra reconstituindo o ambiente vivido em certos círculos judaicos, em São Paulo e neste período, observou que "em 1953, ano que as discussões políticas estiveram muito presentes em casa de judeus - Julius e Ethel Rosenberg foram eletrocutados e morreu Stalin - ...". J.L. PATARRA - *JARA*, Ed. Rosa dos Tempos, Rio de Janeiro, 1992, 2.ed, p.52.

17. A. Ferreira, op.cit, p.102.

18. *CIÊNCIA HOJE*, 15(90), 1993, 44-47.

posto na Technion em Haifa. Para isto contou mais uma vez com a ajuda de Einstein que, apesar das reservas iniciais, escreveu para Rosen recomendando-o.<sup>19</sup> Quando viajou, em janeiro de 1955, o contrato foi suspenso por um ano após o qual foi rescindido. De Israel foi para a Inglaterra ensinando no Birkbeck College da Universidade de Londres desde 1961, da qual foi Professor Emérito.

O Professor David Bohm não mais retornou ao Brasil. Mas não perdia de vista a história deste país. Em 1983, por ocasião das comemorações dos 70 anos de Mario Schenberg, concedeu extenso depoimento a um dos autores.<sup>20</sup> Em janeiro de 1992, perguntado sobre suas lembranças do Brasil, expressou a sua preocupação com os graves problemas sociais do povo brasileiro, em especial com a situação dos "meninos de rua".<sup>21</sup>

## II - A reinterpretação da teoria quântica proposta por Bohm:

O interesse de David Bohm pelos fundamentos da teoria quântica não esgotou-se na redação do seu livro *Quantum Theory*. Concluído o texto ele enviou-o a W. Pauli, N. Bohr e A. Einstein.<sup>22</sup> Pauli respondeu elogiando o conteúdo, mas Bohr não respondeu. Einstein, que trabalhava em Princeton, convidou-o para discussões onde expôs sua própria apreciação a respeito desta teoria. Estas discussões contribuíram para motivar Bohm a buscar uma nova abordagem para estes problemas. Motivado também pelo conhecimento das críticas de físicos soviéticos, como Blokhintsev e Terletski, ele empreendeu a elaboração do trabalho com o qual

19. A. EINSTEIN - Carta a N. Rosen, 11.03.1954.

20. Depoimento a A.L. da Rocha Barros. *Estudos Avançados*, 4(8), 1990, 188-198.

21. Entrevista com O. Freire Jr., 25.01.1992.

22. D. BOHM - *Quantum Theory*, op.cit.. O livro é uma exposição nos marcos da interpretação usual da teoria ainda que com enfoque próprio ao abordar o problema da medida. Mas não se limita à apresentação de resultados já estabelecidos, ele desenvolve, por exemplo, o experimento em pensamento EPR, (proposto em 1935 por Einstein, Podolsky e Rosen) para variáveis bivalentes como componentes de spin, conferindo assim grande simplicidade matemática ao experimento. Foi sob esta forma que Bell desenvolveu, em 1964, o que hoje denominamos "desigualdades de Bell". Por isto alguns autores incluem o nome de Bohm no título do experimento. Ver A. ASPECT, P. GRANGIER & G. ROGER - Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities, *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94, 1982.

marcou de forma duradoura sua participação na história da teoria quântica e de sua interpretação.<sup>23</sup>

O trabalho publicado em 1952 consiste na construção de um modelo físico capaz de reproduzir todos os resultados que podem ser obtidos com a teoria quântica, na sua interpretação usual, mas apoiado em um "quadro conceitual mais amplo" que, com o auxílio de parâmetros adicionais (escondidos), "permite uma descrição contínua, detalhada e causal de todos os processos", mesmo no nível quântico. Obtém-se com isto uma recuperação do determinismo próprio à física clássica.<sup>24</sup>

Tratava-se de uma reinterpretação porque a teoria quântica na interpretação usual, elaborada no período de formação da própria teoria (1925 - 1927) por N. Bohr, W. Heisenberg e M. Born, entre outros, atribui à função que descreve sistemas quânticos como átomos e moléculas um significado essencialmente probabilístico. Com esta função, que é solução da equação formulada por Schrödinger, nós obtemos, através do quadrado de seu módulo, as probabilidades de obtenção dos valores das grandezas físicas envolvidas. Denominada também de "interpretação de Copenhagen",<sup>25</sup> ela afirmou-se na comunidade científica como a interpretação da teoria quântica, no que pese a discordância de físicos eminentes como Schrödinger, Einstein e de Broglie. Este último tentou, entre 1926 e 1927, uma descrição causal da teoria quântica, introduzindo parâmetros adicionais aos já usados, mas desistiu deste programa.

Bohm, contudo, não tinha conhecimento prévio destes trabalhos críticos mais antigos. É devido à precedência de trabalhos como os de L. de Broglie que o historiador da ciência Max Jammer denominou a discussão desencadeada, pelo trabalho de Bohm, na comunidade científica no início da década de 50 como "*O renascimento, por Bohm, das variáveis escondidas*".

Após a elaboração do artigo, e antes da publicação, Bohm tomou conhecimento dos trabalhos prévios ao seu, e das críticas a estes trabalhos. Desenvolveu então, ainda mais sua proposta buscando superar as críticas, e registrou a precedência dos outros trabalhos quando da publicação do artigo. O desenvolvimento realizado foi basicamente a aplicação do próprio modelo ao processo de medida dos sistemas quânticos e foi publicado como a segunda parte do mesmo artigo, conjuntamente com a primeira. Com este desenvolvimento a proposta de Bohm evitava a crítica -

23. M. JAMMER - *The Philosophy of Quantum Mechanics - The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley & Sons, New York, 1974, 278-96.

24. D. BOHM - A Suggested Interpretation, op.cit.

25. Referência à cidade onde foi gestada, sede do Instituto de Física dirigido por Niels Bohr.

impossibilidade de descrever experiências de colisões inelásticas - feita por Pauli<sup>26</sup> à proposta de L. de Broglie, em 1927.

O modelo construído por Bohm trata um sistema quântico, um elétron por exemplo, como uma partícula com posição e momento bem definidos, em todos instantes, e submetida a um campo físico real análogo, mas não idêntico, ao campo eletromagnético. Reescrevendo a função de onda que é solução da equação de Schrödinger ele busca analogias com a física clássica, especialmente com o formalismo hamiltoniano da mecânica. Um obstáculo a esta analogia é que a energia mecânica total, representada pelo Hamiltoniano, comparece nas equações derivadas por Bohm com um terceiro termo (além das energias cinética e potencial) que não tem análogo clássico. Bohm propõe então interpretarmos literalmente este termo como um potencial não clássico, que ele denomina de "potencial quântico".<sup>27</sup>

Neste modelo a mecânica newtoniana clássica não perde a validade no domínio quântico, e Bohm a expressa escrevendo a segunda lei de Newton para uma partícula quântica. Com a equação de movimento dada pelas leis de Newton e mais as condições iniciais temos então recuperado o conceito de trajetória no espaço-tempo que perdeu seu sentido na interpretação usual da teoria quântica.

Estas variáveis - momento e posição de uma partícula - bem definidas no modelo de Bohm são suas variáveis "suplementares" ou "escondidas". A denominação justifica-se pelo fato de a teoria quântica não admitir uma definição, e medição, simultânea de tais variáveis. Na interpretação usual da teoria quântica elas estão condicionadas pelas "relações de indeterminação" de Heisenberg. A descrição no espaço-tempo (trajetórias bem definidas) e as leis de conservação do momento e da energia (que não dependem das trajetórias) são abordagens *complementares* na visão de Niels Bohr, devido à finitude do quantum de ação expresso pela constante de Planck.

26. Pauli mostrou que o modelo proposto por de Broglie não descrevia adequadamente problemas de espalhamento de partículas lançadas contra um rotor, quando se considerava colisões inelásticas. Ver *Electrons et Photons*, Paris, Gauthier-Villars, 1928, pp.280-82.

27. Ele escreve o campo físico do modelo como  $\psi = R \exp(iS/\hbar)$ , com R e S sendo funções reais.

Substituindo esta função na equação de Schrödinger ele obtém as equações:

(1)  $\partial P / \partial t + \text{div}(P \text{ grad } S/m) = 0$ ;

(2)  $\partial S / \partial t + (\text{grad } S)^2/2m + V - \hbar^2/4m(\nabla^2 P/P - (\text{grad } P)^2/2P^2) = 0$ ,

onde  $P = R^2$ . A proposta de Bohm de interpretar o último termo de (2) como um "potencial quântico" a ser incluído no Hamiltoniano, e a suposição do momento da partícula como grad.S, converte a equação (2) na equação de Hamilton-Jacobi, de grande generalidade na mecânica clássica.

Para a consistência da interpretação Bohm adotou premissas<sup>28</sup> adicionais ao seu próprio modelo que, não sendo inerentes ao quadro conceitual da interpretação proposta, poderiam ser relaxadas, por exemplo, para regiões da ordem de  $10^{-13}$  cm - dimensões do núcleo atômico - levando então a previsões distintas daquelas da interpretação usual. Ele chega a assinalar possíveis modificações no seu modelo, mas não as desenvolve.

Conseguindo reproduzir, com seu modelo, alguns dos principais resultados da teoria quântica não relativística, Bohm obteve êxito em seu propósito básico, o de demonstrar a possibilidade de uma interpretação causal para os fenômenos quânticos.

Cabe notar que a proposta de Bohm, extensiva ao processo da medida, implica a mesma propriedade, contida na interpretação usual, de não localidade para sistemas separados espacialmente que interagiram no passado. A não localidade, em Bohm, é decorrência de considerar os resultados das grandezas físicas como resultante da interação dos sistemas com os aparelhos de medida. Estes também comportam variáveis escondidas que são incluídas na construção do Hamiltoniano da interação aparelho-sistema. É também esta característica que evita a prova de Von Neumann, de 1932, contra a possibilidade de interpretação da teoria quântica em termos de variáveis escondidas.

### III - A recepção da proposta de Bohm na comunidade científica.

O trabalho de Bohm desencadeou forte repercussão na comunidade científica. Pelo menos os seguintes cientistas a analisaram: A. Einstein, L. de Broglie, W. Pauli, O. Halpern, S.T. Epstein, T. Takabayasi, J.B. Keller, J.P. Vigié, E. Schatzman, H. Freidstadt, L. Rosenfeld, J.L. Destouches.<sup>29</sup>

Prevaleceram atitudes críticas embora tenha existido adesões, em geral no terreno epistemológico. Mas as críticas não tiveram o caráter de uma refutação direta no terreno estrito da física, ou seja não foram apontadas discrepâncias entre a interpretação de Bohm e resultados experimentais. As

28. O momento da partícula, que é dado pelo gradiente de S, a validade da equação de Schrödinger e a equivalência entre a função  $R^2$  do modelo e a densidade de probabilidade própria da teoria quântica.

29. Ver, além das referências já incluídas neste artigo, J.L. DESTOUCHES - Retour sur le passé, in A. GEORGE (ed) - *Louis de Broglie, Physicien et Penseur*, Paris, Editions Albin Michel, 1953, p.67-85, e S.T. EPSTEIN - The Causal Interpretation of Quantum Mechanics, *Physical Review*, 89, 1952, p.319 e *Physical Review*, 91(4), 1953, p.985.

críticas dirigiram-se à consistência física do modelo ou à sua moldura epistemológica. Bohm não aceitou passivamente as críticas. Polemizou com quase todas.<sup>30</sup> Mas o fez em geral apresentando novos argumentos e mesmo desenvolvendo o seu programa. Estas respostas e estes desenvolvimentos foram elaborados quando da estadia na USP.<sup>31</sup> Aliás quando o artigo inicial - "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables" foi publicado o endereço institucional de Bohm já era a Universidade de São Paulo. Examinemos algumas das recepções:

#### O debate com Einstein.

A recepção crítica de Einstein, provavelmente não esperada por Bohm, é muito esclarecedora da natureza das posições do primeiro sobre a teoria quântica. Há no período uma intensa correspondência entre Einstein e Bohm.<sup>32</sup> As divergências tornam-se públicas, em 1953, por ocasião da edição de livro em homenagem a M. Born.

Einstein<sup>33</sup> se propõe a discutir a questão: "... que diz a função sobre o 'estado real' (individual)" de um sistema quântico? Para desenvolver a discussão ele "... reflete sobre os enunciados da mecânica quântica relativos aos sistemas macroscópicos; quer dizer, objetos dos quais nós temos evidências sensíveis diretas". Para estes sistemas ele pergunta: "... a descrição 'real' fornecida pela mecânica clássica está implicitamente contida (de forma aproximada, evidentemente) na mecânica quântica?"

Einstein examina concretamente um experimento idealizado onde "o sistema é constituído por uma esfera de 1 mm de diâmetro, que

realiza um movimento de vai-e-vem (ao longo do eixo 'x' de um sistema de coordenadas) entre duas paredes paralelas (distantes uma da outra cerca de 1 m)." Algumas idealizações são feitas: choques elásticos, paredes substituídas por "poços" de potencial que só dependem das coordenadas de posição e esfera descrita exclusivamente pela coordenada do centro de gravidade, ou seja, tratada como um ponto material.

A forma analítica da função que, na teoria quântica, descreve o estado deste sistema é dada por uma superposição de duas ondas propagando-se em direções opostas. Ele coteja esta função com as interpretações disponíveis.

A interpretação usual fornece para o momento da partícula "dois valores nítidos e precisos, opostos e quase iguais, coincidindo aliás com os valores clássicos, e afetados todos os dois com a mesma probabilidade". Einstein conclui então que os resultados seriam os mesmos, aproximadamente, obtidos para um conjunto de várias esferas macroscópicas tratadas classicamente. Ele conclui com o seu conhecido diagnóstico sobre a teoria quântica: a interpretação usual, proposta por M. Born, é "perfeitamente satisfatória" mas incapaz de uma descrição real de um sistema individual, já que em cada caso individual clássico nós teremos sempre um dos dois valores para o momento da esfera.

A sua insatisfação com a proposta de Bohm é muito simples de ser relatada. É que nesta interpretação a velocidade da partícula<sup>34</sup> será sempre nula. A interpretação proposta por Bohm é pouco plausível e por isto insatisfatória já que "... o fato que a velocidade seja nula está em contradição com a exigência, bem fundada, segundo a qual para um sistema macroscópico o movimento deve ser aproximadamente idêntico àquele que decorre da mecânica clássica." A conclusão geral extraída por Einstein é bastante forte no contexto da recepção à proposta de Bohm. Conforme Einstein "das considerações precedentes resulta que a única interpretação da equação de Schrödinger admissível, até o presente, é a interpretação estatística dada por Born."

A crítica de Einstein, contudo, não colocou para Bohm uma situação nova. É que ele já tinha tratado, no artigo de 1952, de uma situação análoga, isto é: "o problema de uma partícula 'livre' contida entre duas paredes impenetráveis e perfeitamente refletoras."<sup>35</sup> Ele tratou deste

34. A velocidade é dada pelo gradiente de  $S/m$ , e para este fenômeno será nula pois a função  $S$  não depende das coordenadas espaciais.

35. D. BOHM - A Suggested Interpretation, op.cit., p.193.

30. Ver D. BOHM - Reply to a Criticism of the Causal Re-Interpretation of Quantum Theory - *Physical Review*, 87, 1953, 389-90; Comments on an Article of Takabayasi Concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures, *Progress of Theoretical Physics*, 9(3), 1953, 273-87, e Comments on a Letter concerning the Causal Interpretation of the Quantum Theory, *Physical Review*, 89, 1952, 319-20; além das referências já contidas neste artigo.

31. A ausência de estudos históricos sobre este período da atividade de Bohm tem contribuído para afirmações imprecisas como esta: "Histórias de cientistas como Frank Oppenheimer e David Bohm, que foram forçados a abandonar a pesquisa por anos, elevou a tensão entre cientistas". J. WANG, op.cit., p.267.

32. Para uma análise mais abrangente das discussões e correspondência entre Bohm e Einstein, das semelhanças e diferenças dos respectivos programas científicos, ver M. PATY - Sur les "variables cachées" de la mécanique quantique - Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, 292, 1993, 93-116. Para uma análise da posição de Einstein face à teoria quântica, ver M. PATY - *Einstein, les quanta et le réel*, a aparecer.

33. A. EINSTEIN - Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique, in A. EINSTEIN - *Oeuvres Choisies*, Vol. 1 (Mécanique Statistique et physique quantique), ed. par F. Ballbar, B. Jech et O. Darrigol, Paris, 1989, 251-256. Original in *Scientific Papers presented to Max Born*, Edinburgh, Oliver and Boyd, 33-40, 1953.

problema motivado pelo trabalho de N. Rosen<sup>36</sup> que havia examinado o mesmo modelo, desenvolvido ulteriormente por Bohm, e descartou-o ao constatar que para ondas estacionárias o modelo descrevia partículas sempre em repouso ou era incapaz de descrever os fenômenos de interferência. Na visão de Rosen isto conflitava com a idéia de um elétron confinado, por exemplo no átomo de Hidrogênio, para o qual o tratamento quântico adequado supõe variáveis, como momento angular, contraditórias com a imagem de um elétron em repouso.

Na sua resposta a Einstein, Bohm afirma,<sup>37</sup> com naturalidade, que efetivamente no seu modelo para a interpretação causal a partícula estará em repouso, mas que a aplicação da proposta ao próprio processo de medida destruiria esta função  $\psi$  transformando-a num pacote de ondas com momentos (+p e -p) igualmente prováveis, levando a "resultados experimentais equivalentes aos preditos pela interpretação usual."

A resposta não satisfaz Einstein. Observe-se que para Bohm obter resultados compatíveis com os da teoria quântica era necessário aplicar o modelo das variáveis escondidas ao próprio processo de medida, condicionando por isto a descrição dos fenômenos quânticos à interação com os aparelhos de medida. Característica epistemológica comum à proposta de Bohm e à interpretação usual,<sup>38</sup> e inaceitável para Einstein.

36. N. ROSEN - On Waves and Particles, *Journal of the Mitchell Society*, 61, 1945, 67-73.

37. D. BOHM - A Discussion of Certain Remarks by Einstein on Born's Probability Interpretation of the  $\psi$  Function, in *Scientific Papers presented to Max Born*, Edinburgh, Oliver and Boyd, 13-19, 1953.

38. Esta proximidade epistemológica entre D. Bohm e N. Bohr foi identificada por Jammer que, referindo-se à parte II do trabalho (1952) de Bohm, afirma: "... sua ênfase, provavelmente sob o impacto das críticas de Pauli, sobre a dependência das medidas de probabilidade das variáveis escondidas com referência ao tipo de observáveis medidos, isto é, sobre a relação integral entre o sistema e o dispositivo de medida, é obviamente um definido *rapprochement* com a 'característica de totalidade' de Bohr". Ver M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op.cit., pp.286-87. Ver também J. BUB - Hidden Variables and the Copenhagen Interpretation - A Reconciliation, *Brit. J. Phil. Sci.*, 19, 1968, 185-210, onde esta proximidade é analisada mais amplamente. O próprio Bohm reconhecia, em algumas ocasiões, esta proximidade. Em 1957, debatendo com L. Rosenfeld, ele declarou: "A diferença entre a minha posição e a do Prof. Rosenfeld é esta: ambos concordamos que a presente mecânica quântica implica que o aparelho desempenha um papel muito fundamental ajudando a produzir [o fenômeno], porque existe um acoplamento muito sensível entre o objeto e o aparelho. Mas eu proponho um modelo que visa explicar porque isto acontece". S. KÖRNER - *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics - With Special Reference to Quantum Mechanics*, Dover Publications, New York, 1957, p.61.

A crítica de Pauli e outras críticas à consistência física do modelo de Bohm.

Uma das críticas mais importantes feita por Pauli,<sup>39</sup> nesta fase dos debates sobre os fundamentos da teoria, foi que a validade geral da equivalência feita por Bohm entre o campo associado ao "potencial quântico" do modelo proposto e a distribuição de probabilidade associada à função de onda da teoria quântica não se sustentava, pois a segunda tinha seu significado delimitado pelo seu próprio quadro teórico. Crítica semelhante foi sustentada também por J. B. Keller<sup>40</sup>.

Outros físicos, como O. Halpern e T. Takabayasi<sup>41</sup> concentraram as críticas no fato que a proposta de Bohm reproduzia os resultados da teoria quântica não relativística, mas não fazia o mesmo para fenômenos que dependessem da variável spin, os quais podem ser tratados pela formulação relativística da teoria quântica elaborada por Dirac. Além disso estes autores sustentaram não ser possível desenvolver o modelo de Bohm de forma a concordar com a mecânica quântica relativística. Esta crítica, no contexto da física do início dos anos 50, adquiria bastante força pois a teoria quântica relativística acabava de receber significativo desenvolvimento nos trabalhos de R. Feynman, S. Tomonaga e J. Schwinger.

#### Adesões e críticas epistemológicas

A perspectiva epistemológica de recuperação de uma descrição física determinista e objetiva, no sentido clássico, recebeu adesões de físicos como Freidstadt, nos EUA, e Schatzman, na França.<sup>42</sup> Mas exatamente esta perspectiva foi objeto de críticas essencialmente epistemológicas por L. Rosenfeld<sup>43</sup> que defendeu as aquisições conceituais e epistemológicas da

39. W. PAULI - Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique, in A. GEORGE (ed) - *Louis de Broglie - Physicien et Penseur*, op.cit., 33-42.

40. J.B. KELLER - Bohm's Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables - *Physical Review*, 89(5), 1040-41, 1953.

41. O. HALPERN - A Proposed Re-Interpretation of Quantum Mechanics, *Physical Review*, 87, p.389, 1952; T.TAKABAYASI - On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures, *Progress of Theoretical Physics*, 8(2), 143-182, 1952, e Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar-Fields and Hydrodynamical Fields, *Progress of Theoretical Physics*, 9(3), 187-222, 1953.

42. H. FREISTADT - The Crisis in Physics, *Science and Society*, 17, 1953, 211-37 e E. SCHATZMAN - Physique quantique et réalité, *La Pensée*, 42-43, 1952, pp.107-122.

43. L. ROSENFELD - L'évidence de la complémentarité, in L. de BROGLIE - *Physicien et Penseur*, op.cit., 43-65. As discussões entre Bohm e Rosenfeld tiveram seu ápice em um Simpósio, em 1957, em Bristol, quando após a exposição de cada um seguiu-se acirrado debate. Mas a crítica de Rosenfeld nem sempre foi

interpretação usual da teoria quântica. É notável que os três autores pretenderam apoiar-se no mesmo terreno filosófico - materialismo dialético - mas defendendo distintas interpretações físicas para esta teoria. Já T. Takabayasi,<sup>44</sup> embora explorando modelos físicos semelhantes ao construído por Bohm considerou "um passo atrás", e "metafísica", a busca de uma descrição causal clássica por não levar a previsões distintas das existentes nas teorias já estabelecidas.

A atitude de Louis de Broglie, bem como a de J.P. Vigiér, não é passível de um enquadramento único pois combinou uma adesão ao programa epistemológico de recuperação da descrição causal clássica com críticas quanto à simplicidade do modelo físico.<sup>45</sup> O retorno de Louis de Broglie às suas posições de 1926-1927 foi motivada pela situação insólita de Bohm ter retomado e desenvolvido seu modelo original a ponto de livrá-lo das críticas sofridas à época, mas também pelas discussões realizadas com J.P. Vigiér, então seu assistente.

#### IV - Desenvolvimentos no trabalho de Bohm em sua estadia no Brasil.

A sensibilidade de Bohm à crítica de Pauli e Keller ficou evidente quando dedicou dois trabalhos à demonstração de que a grandeza representando a densidade de probabilidade de seu modelo, que é arbitrária, pode ser igualada aos valores da densidade de probabilidade própria da teoria quântica, justificando assim a associação entre as duas grandezas. Aliás entre os dois trabalhos existe um percurso, e uma mudança no modelo adotado por Bohm. No primeiro trabalho, apresentado em janeiro de 1953, ele anuncia a existência de artigo, a ser publicado nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências* - no qual será apresentada uma prova geral da possibilidade desta

exclusivamente epistemológica. No debate citado, por exemplo, ele sustentou que "um esquema como o de Bohm não pode ser inteiramente consistente logicamente e compatível com a existência do quantum de ação". Para as duas intervenções e o relato dos debates, ver S. Korner (ed) - *Observation and Interpretation*, op.cit., pp.31-61. Esta mesma crítica foi feita por Niels Bohr, conforme relato do próprio David Bohm. Ver D. BOHM - *Wholeness and the Implicate Order*, ARK Paperbacks, London, 1983, p.84. 44. T. TAKABAYASI, op.cit.

45. Ao modelo desenvolvido por Bohm, que ele denomina de "onda-piloto", de Broglie contrapõe o modelo da "dupla-solução" alterando a linearidade do formalismo da teoria quântica. Para uma revisão das suas posições, ver L. de BROGLIE - *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* (1952), in L. de BROGLIE - *Nouvelles perspectives en microphysique*, Albin Michel, Paris, 1956.

associação, pois neste primeiro trabalho a prova está baseada em um "exemplo ilustrativo simples".<sup>46</sup>

O trabalho anunciado por Bohm, contudo, não foi publicado. Já no segundo trabalho,<sup>47</sup> em conjunto com J.P. Vigiér, apresentado em junho de 1954, um ano e meio depois, aparece a explicação: "No trabalho citado acima,<sup>48</sup> todavia, certas dificuldades matemáticas tornam muito difícil uma generalização dos resultados para um sistema arbitrário ... No presente artigo evitaremos estas dificuldades beneficiando-nos do fato que a interpretação causal da teoria quântica permite um número ilimitado de novos modelos físicos, de tipos não consistentes com a interpretação usual e que levam a esta tão somente como uma aproximação".

O modelo trabalhado no artigo não é mais aquele da partícula, com trajetória bem definida, sob influência de um campo físico derivado do "potencial quântico", mas sim um modelo hidrodinâmico, proposto originalmente por Madelung em 1926, onde a densidade do fluido é associada, por analogia, à densidade de probabilidade própria da teoria quântica. Para obter uma descrição causal da localização de uma partícula os autores acrescentaram a este modelo uma inomogeneidade altamente localizada movendo-se com a velocidade do fluxo. Admitiu-se também a existência de flutuações aleatórias nos movimentos deste fluido. Os autores não desenvolveram hipóteses sobre a natureza destas flutuações, elas foram adotadas como premissas, condicionadas a que seus valores médios fossem associados às grandezas próprias da interpretação usual da teoria quântica. Bohm e Vigiér denominaram este fluido sujeito a flutuações aleatórias de "nível sub-quântico". Como o principal resultado do artigo foi "... responder uma importante objeção à interpretação causal, feita por Pauli e outros", podemos concluir que foram as dificuldades matemáticas implicadas nesta prova que levaram Bohm a abandonar o modelo original e trabalhar com o modelo hidrodinâmico da teoria quântica.

Para a elaboração do trabalho J.P. Vigiér, que então trabalhava com L. de Broglie no Instituto Henri Poincaré em Paris, passou um mês em São Paulo. Para esta estadia Vigiér contou com subsídios do Conselho Nacional de Pesquisas - CNPQ - e da Seção de Relações Culturais da França.

46 D. BOHM - Proof that Probability Density Approaches  $\psi^2$  in Causal Interpretation of the quantum Theory - *Physical Review*, 89(2), 458-466, 1953, (ver nota 4, à p. 460). Uma versão reduzida, e simplificada, foi apresentado em Simpósio Internacional e está publicada em "New Research Techniques in Physics", Proceedings, [Rio de Janeiro and São Paulo, July, 15-29, 1952], Rio de Janeiro, 1954, 187-98.

47. D. BOHM & J.P. VIGIER - Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations - *Physical Review*, 96(1), 208-16, 1954.

48. D. BOHM - Proof that Probability, op.cit.

Este trabalho representou também uma aproximação entre o trabalho científico de Bohm e L. de Broglie.<sup>49</sup>

### O desafio da generalização relativística.

Generalizar o modelo de variáveis "escondidas" para o caso relativístico foi outro grande desafio enfrentado por Bohm ainda no Brasil. Mas só após o trabalho conjunto com J.P. Vigiér, já no modelo hidrodinâmico, é que o desafio recebeu um tratamento mais desenvolvido, e isto foi feito em dois trabalhos em conjunto com R. Schiller e com o físico brasileiro J. Tiomno,<sup>50</sup> então na USP. Nestes trabalhos é obtido o spin do elétron reproduzindo resultados da equação de Pauli. Mas a equação obtida ainda não é relativística. Bohm e Schiller afirmam: "Certamente nós não acreditamos que um modelo baseado sobre uma explicação da equação de Pauli será realmente adequado aos propósitos descritos no parágrafo anterior porque ele não é relativístico. Um modelo baseado sobre uma explicação da equação de Dirac (e melhor ainda com segunda quantização) deveria, contudo, dar um tratamento muito mais preciso do que seria possível com o modelo dado neste artigo." As dificuldades associadas à generalização relativística dos modelos construídos por Bohm não foram superadas, fato reconhecido pelo próprio Bohm em escritos posteriores.<sup>51</sup>

Tiomno trabalhou com Bohm motivado pela busca das conseqüências, matemáticas e físicas, do modelo adotado, mas sem compartilhar o programa epistemológico da recuperação de uma descrição causal.<sup>52</sup> Por esta razão, e pelas mudanças, sua para o Rio de Janeiro e de Bohm para Israel, este trabalho não teve desdobramentos na produção científica ulterior de Jaime Tiomno.

49. J.P. Vigiér, que tem prosseguido a pesquisa sobre modelos de variáveis "escondidas", declarou recentemente que "a estadia no Brasil, para mim, foi muito importante para respondermos algumas questões fundamentais que David Bohm havia suposto à época". Entrevista com O. Freire Jr., 27.01.1992, a ser publicada. A colaboração Vigiér - Bohm estendeu-se a modelos de hidrodinâmica relativística.

50. D. BOHM, R. SCHILLER and J. TIOMNO - A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A), *Nuovo Cimento*, Suppl. ao Vol I(1), 48-66, 1955 e D. BOHM & R. SCHILLER - A Causal Interpretation of the Pauli Equation, (B), *Nuovo Cimento*, Suppl. Vol I(1), 67-91, 1955.

51. Ver D. BOHM - Hidden Variables in the Quantum Theory, in D.R. BATES - *Quantum Theory*, V.III - Radiation and High Energy Physics, Academic Press, New York, 1962, 345-87, p.386. Reproduzido em D. BOHM - *Wholeness and the Implicate Order*, ARK, London, 1983; traduzido para o português por M. de Campos Silva e revisado por N.R. Eichenberg em D. BOHM - *A Totalidade e a Ordem Implicada*, Cultrix, São Paulo, 1992.

52. Depoimento a O. Freire Jr. - abril de 1993.

Bohm realizou, ao longo dos anos 60, importante flexão no seu programa científico e epistemológico. Abandonou os modelos concretos de 1952-54, justificando que: "todas as noções (variáveis escondidas) são bastantes consistentes logicamente. Mas deve ser admitido que elas são difíceis de entender de um ponto de vista físico ... elas deveriam ser vistas como o próprio potencial quântico, como representações esquemáticas ou preliminares de certas características de algumas idéias físicas mais plausíveis a serem obtidas ulteriormente."<sup>53</sup>

A percepção do "potencial quântico" como representação esquemática de idéias físicas mais plausíveis levou-o a dedicar-se, dos anos 70 em diante, ao projeto de matematizar uma intuição derivada da proposta de 1952. Ele viu no "potencial quântico" que dependia das coordenadas de todo o sistema uma indicação mais geral: a de uma teoria física onde cada parte dependesse de todo o Universo, denominando esta intuição de "implicate order".<sup>54</sup> O desenvolvimento destas novas idéias físicas diferiu também dos seus trabalhos do início dos anos 50. Ao invés de busca "modelos" físicos para reproduzir as previsões da teoria quântica, Bohm desenvolveu seu programa buscando evidenciar as propriedades matemáticas (algébricas) mais gerais contidas no formalismo das teorias quântica e relativística.

Mas a flexão não foi restrita à abordagem física. A ênfase na recuperação de uma "descrição causal" dos fenômenos quânticos foi atenuada, subordinando-se ao propósito de revelar o que chamou de "nova ordem" em física, entendendo por isto o quadro conceitual mais geral subjacente à relatividade e aos quanta. Uma evidência desta modificação epistemológica nós encontramos no artigo inaugural do programa de "implicate order". Bohm recorre ao sentido latino original das palavras *ratio* para mostrar que ela tem um significado mais amplo que a palavra *reason*, afirmando em seguida: "Lei racional não está restrita a uma expressão de *causalidade*. Evidentemente que razão, no sentido aqui atribuído, vai além de causalidade, a qual é um caso especial de razão", e "deste modo, uma lei causal fornece um certo *tipo limitado* de razão. Contudo, de modo mais geral, uma explicação racional toma a forma: 'se objetos estão relacionados em um certo conceito, ou idéia, então eles estão relacionados de

53. D. Bohm - Hidden Variables in the Quantum Theory, op.cit.

54. A apresentação destas idéias está em D. BOHM - Quantum Theory as an Indication of a New Order in Physics. Part A. The Development of New Orders as Shown Through the History of Physics, *Foundations of Physics*, 1(4), 1971, 359-381, p.362; e Part B. Implicate and Explicate Order in Physical Law, *Foundations of Physics*, 3(2), 1973, 139-68. Reimpressos em *Wholeness and the Implicate Order*, op.cit.

fato".<sup>55</sup> O programa da "implicate order" é hoje um programa em desenvolvimento, despertando atenções em círculos culturais mais amplos que a comunidade dos físicos.<sup>56</sup>

Além de suas próprias propostas de reinterpretação da teoria quântica David Bohm deu outras importantes contribuições ao esclarecimento dos fundamentos desta teoria. Em 1959, junto com Y. Aharonov mostrou que a teoria quântica implicava que um dos potenciais eletrodinâmicos - o potencial vetor - tenha significado físico, embora na física clássica este potencial tenha significado apenas matemático; efeito que hoje é conhecido como "efeito Bohm-Aharonov".<sup>57</sup> Ainda com Aharonov, mostrou, ainda no final da década de 50, que experimentos já realizados com fótons criados na aniquilação elétron-pósitron podiam ser reinterpretados para fins de verificação do experimento EPR, proposto em 1935 por Einstein. E que os resultados destes experimentos confirmavam as previsões da teoria quântica, antecipando-se em certo sentido aos contemporâneos testes experimentais das desigualdades de Bell.<sup>58</sup>

Bohm tem o mérito de, com os modelos de variáveis "escondidas" (ainda que pouco plausíveis, como ele mesmo reconheceu posteriormente), ter contribuído para reavivar a discussão sobre os fundamentos da teoria quântica.<sup>59</sup> Discussão esta que guarda atualidade com importantes desenvolvimentos nas últimas décadas.

#### V - Discussões, no Brasil, sobre a teoria quântica

David Bohm discutiu muito com Mário Schenberg mas não há trabalhos publicados pelos dois. Uma evidência das discussões nós temos na afirmação de Bohm que passou a "estudar a História da Filosofia, considerando o desenvolvimento do mecanicismo, principalmente, depois de discussões com Mário Schenberg, sobre uma abordagem dialética da

55. D. BOHM - Quantum Theory as an Indication, op.cit., p.362.

56. Por exemplo A. RIOJA - Orden implicado "versus" orden cartesiano. Reflexiones en torno a la filosofia de David Bohm, *LLULL*, 15, 1992, 369-394. Ver também D. BOHM and F. DAVID PEAT - *Science, Order & Creativity*, Routledge, London, 1989.

57. D. BOHM & Y. AHARONOV - Significance of Eletromagnetic Potentials in the Quantum Theory, *Physical Review*, 115(3), 485-91, 1959.

58. D. BOHM & Y. AHARONOV - Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, Podolsky, *Physical Review*, 108(4), 1070-76, 1957.

59. Com esta compreensão um dos autores criticou a redução da obra de Bohm ao contexto dos anos 50. O. Freire Jr. - Response to Cross - Comment on "The Crisis in Physics", *Social Studies of Science*, 22(4), 739-42, 1992.

causalidade.<sup>60</sup> Mas as indicações que dispomos são indicativas de uma distância entre os dois com referência à apreciação epistemológica da teoria quântica, ou pelo menos quanto à proposta formulada por Bohm.

Mario Bunge, físico e filósofo argentino, contemporâneo das discussões entre Bohm e Schenberg, pois veio para o Brasil para trabalhar com Bohm, testemunhou as diferenças afirmando: "Meu segundo encontro com Schenberg foi em 1953 no Instituto de Física, então localizado na rua Maria Antonia. Ele tinha retornado da Europa há pouco e eu usava uma bolsa de estudos para passar o semestre trabalhando com David Bohm. Desta vez nosso encontro não foi tão feliz quanto a primeira porque eu tinha me convertido à teoria das variáveis escondidas de Bohm, da qual Schenberg discordava. Quando eu abordei-o com algumas idéias sobre partículas, ele cortou-me subitamente: 'Eu não estou interessado em partículas'. Naquela época eu fiquei chocado com tal aparente conservadorismo. Poucos anos depois eu percebi o quanto ele estava certo."<sup>61</sup>

A análise dos próprios trabalhos de Schenberg sobre fundamentos da teoria quântica publicados no período indica que ele dialogava com o programa proposto por Bohm mas sem uma identificação. Schenberg estava mais interessado em explorar diferenças, formais e empíricas, em relação à interpretação usual, decorrentes de generalizações no formalismo da teoria quântica, do que em desenvolver a proposta original de Bohm no sentido de reproduzir os resultados previstos pela interpretação usual e, neste sentido, elaborou uma generalização não linear da teoria quântica,<sup>62</sup> apresentando soluções para o formalismo generalizado.<sup>63</sup> Tendo aplicado os métodos de segunda quantização à estatística clássica e à teoria clássica de campos e chegando à conclusão que este método não é essencialmente quântico, estende a sua aplicação à interpretação hidrodinâmica proposta por Madelung em 1926.<sup>64</sup> Mostra então que as trajetórias das partículas, do modelo de Bohm, podem ser deduzidas das linhas de fluxo. Schenberg explora diversas possibilidades buscando

60. D. BOHM - O Aparente e o Oculto, op.cit.

61. M. BUNGE - Hidden Variables, Separability, and Realism, *Revista Brasileira de Física*, Vol. Esp., Julho 1984, 150-68.

62. M. SCHENBERG - A Non-Linear Generalization of the Schrödinger and Dirac Equations, I e II, *Nuovo Cimento*, 11(6), 674-682, 1954; e 12, p.649, 1954.

63. M. SCHENBERG - Simple Solution of the Generalized Schrödinger Equations - *Nuovo Cimento*, 12, p.300, 1954; e Simple Solutions of the Generalized Schrödinger and Dirac Equations, *Nuovo Cimento*, 12(6), p.1, 1954.

64. M. SCHENBERG - On the Hydrodynamical Model of the Quantum Mechanics, *Nuovo Cimento*, 12, p.103, 1954 e Vortex Motion of the Madelung Fluid, *Nuovo Cimento*, 13, p.543, 1955.

identificar as propriedades matemáticas, e físicas, subjacentes ao formalismo da teoria quântica, mas sem a preocupação com a recuperação de uma "descrição causal e objetiva", lema epistemológico da produção de Bohm.

Podemos contudo falar de uma tardia aproximação entre Bohm e Schenberg sobre os fundamentos da teoria quântica. Vejamos por que "tardia". Numa série de artigos publicados a partir de 1957, Schenberg buscou generalizações das estruturas algébricas subjacentes ao formalismo da teoria quântica.<sup>65</sup> Estes trabalhos têm correlação com as tentativas, feitas por Bohm e Basil Hiley, da década de 70 em diante, de matematizar as intuições associadas à "implicate order". Perguntado, no início dos anos 80, sobre a teoria dos "spinors" (entes matemáticos fundamentais na mecânica quântica relativística) e a sua visão algébrica da realidade física, Bohm respondeu:

"Isso também surgiu do meu contato com Mário Schenberg, que deu uma enorme contribuição a esse respeito. Pode-se ter uma visão da Mecânica Quântica Fermiônica e Bosônica através da Álgebra, e Schenberg realizou essa ligação (outras pessoas também fizeram o mesmo, porém mais tarde). Para expressar a "implicate order", trabalhamos numa continuação, numa extensão de idéias semelhantes".<sup>66</sup> Observamos, quanto ao alcance destes trabalhos, que Schenberg "dava uma idéia clara da introdução da supersimetria ao nível das álgebras geométricas", conforme apontado por Normando Fernandes.<sup>67</sup> Mas o desenvolvimento deste programa científico sofreu injunções derivadas do golpe militar de abril de 1964: "se os acontecimentos políticos da época fossem outros, se Schenberg não tivesse sofrido perseguições políticas e ameaças de prisão, provavelmente o capítulo da supersimetria teria os físicos brasileiros em destaque".<sup>68</sup>

O reconhecimento mais expressivo da tardia aproximação está na introdução de um dos primeiros artigos de Bohm sobre o tema.

65. Ver M. SCHENBERG - Quantum Kinematics and Geometry, *Nuovo Cimento*, Suppl. 6, p.356, 1957. Para uma notícia concisa sobre estes trabalhos de Schenberg, ver A.L. da Rocha Barros - Schenberg e as álgebras geométricas da teoria quântica, *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Física*, n.1, Junho de 1991, 7-9; e para diversos trabalhos relacionados à obra científica de Schenberg, ver A.L. da Rocha Barros (ed) - *Perspectivas em Física Teórica - Simpósio Internacional em Homenagem aos 70 anos de Mario Schenberg*, Instituto de Física da USP, São Paulo, 1987.

66. D. BOHM, O Aparente e o Oculto, op.cit., p.197.

67. N.C. FERNANDES - Mário Schenberg e a descoberta da supersimetria, *Boletim Informativo da SBF*, junho 1991, 3-6.

68. A.L. da ROCHA BARROS - Schenberg e as álgebras geométricas da teoria quântica, *Boletim Informativo da SBF*, junho 1991, 7-9. Ver também A.L. da ROCHA BARROS - Schenberg e a visão algébrica da realidade física, e N.C. FERNANDES - As álgebras de Grassmann-Schoenberg e grande unificação; in A.L. da ROCHA BARROS (ed) - *Perspectivas em física teórica*, op. cit., 130-43 e 368-90.

Registrando as diversas interpretações existentes para o significado dos "spinors", Bohm identifica a singularidade do caminho trilhado por Schenberg, que estabeleceu uma relação destes objetos com o espaço de fase, para afirmar significativamente "Neste artigo nós começaremos combinando a Álgebra de Clifford com a interpretação de Schenberg do espaço de fase, mostrando a interrelação dos dois e desenvolvendo, de forma sistemática, o conjunto da teoria".<sup>69</sup> F.A.M. Frescura e B. Hiley, que trabalharam com Bohm neste programa também identificaram a contribuição do físico brasileiro afirmando: "Os aspectos geométricos destas álgebras já tinham sido discutidos por Schenberg, embora a motivação do seu trabalho fosse bastante distinta".<sup>70</sup>

Durante a estadia de Bohm no Brasil, aqui estiveram R.P. Feynman e L. Rosenfeld, ambos como professores visitantes no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF - no Rio de Janeiro. Discussões entre Bohm e Feynman ficaram registradas quando o primeiro declarou, ao final de um dos artigos da época,<sup>71</sup> que "deseja agradecer ao Professor R.P. Feynman por várias discussões interessantes e estimulantes."

Indicações de discussões, no Brasil, entre Bohm e Rosenfeld são mais escassas. Rosenfeld trabalhava neste período exatamente sobre questões epistemológicas associadas à teoria quântica. Publicou nos "Anais da Academia Brasileira de Ciência" o artigo "Causalité Statistique et Ordre en Physique et en Biologie"<sup>72</sup>, considerado pelo próprio autor como importante "... para esclarecer seus pensamentos sobre os problemas biológicos."<sup>73</sup> Publicou também, em português, artigo de divulgação intitulado "A filosofia da física atômica", onde faz defesa da interpretação usual e do pensamento de Niels Bohr.<sup>74</sup> Rosenfeld esteve na USP realizando

69. D. BOHM and B.J. HILEY - Relativistic Phase Space Arising out of the Dirac Algebra, in A. van der Merwe (ed) - *Old and New Questions in Physics, Cosmology, Philosophy, and Theoretical Biology*, Plenum Press, New York, 1983, 67-76.

70. F.A.M. FRESCURA & B. HILEY - The Algebraization of Quantum Mechanics and the Implicate Order, *Foundations of Physics*, 10(9-10), 1980, 705-22. Em outro artigo, escrito como contribuição aos 70 anos de Schenberg, os mesmos autores afirmaram: "Schenberg já havia investigado tal assunto e mostrado que as estruturas subjacentes a estas álgebras são extensões das álgebras comutativas e anti-comutativas de Grassman, as quais têm as mesmas estruturas que as álgebras bosônicas e fermiônicas dos operadores de criação e aniquilação." F.A.M. FRESCURA & B. HILEY - Algebras, Quantum Theory and Pre-Space, *Revista Brasileira de Física*, vol.especial 70 anos de M. Schoenberg, 1984, 49-86.

71. D. BOHM - Proof That Probability (...) - *Phys Rev*, op.cit.

72. L. ROSENFELD - Causalité Statistique et Ordre en Physique et en Biologie - *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 26(1), 47-50, 1954.

73. L. ROSENFELD - Carta a Niels Bohr, 21.04.1954, Catalog of the Bohr Scientific Correspondance, in *Archives for the History of Quantum Physics*.

74. L. ROSENFELD - A filosofia da Física atômica - *Ciência e Cultura*, 6(2), 67-72, 1954.

seminário que contou com a participação de Bohm. A ausência de referências mútuas, ou de colaboração, entre Bohm e Rosenfeld, apesar dos dois estarem trabalhando sobre o mesmo tema, no mesmo país e na mesma época, se explica pela distância, já referida, entre suas respectivas posições sobre a interpretação da teoria quântica.

O diálogo com Feynman provavelmente foi facilitado pela posição cautelosa que ele adotou, à época, quanto aos desdobramentos imediatos da física. Em artigo publicado, nos Anais da Academia Brasileira de Ciências, ele examina "uma lista dos problemas fundamentais em física teórica", cita as diversas tentativas de solução em curso referindo-se à "teoria do campo não-local, reinterpretação da mecânica quântica (grifos nossos), ... , etc" para, de forma significativa, afirmar que, "como uma reflexão atual mostra, não existe em absoluto bases, que não os preconceitos autoritários, sobre as quais seu valor potencial possa ser julgado ( a menos que elas já estejam em discordância com experimentos conhecidos ) até que uma delas chegue a obter êxitos."<sup>75</sup>

As discussões entre Bohm e Feynman tiveram o testemunho de Leite Lopes, que refere-se às discussões realizadas durante a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) em Belo Horizonte, no ano de 1952, registrando o contraste com físicos que à época hostilizaram Bohm reduzindo o seu modelo a uma tentativa ideológica de reinterpretação da mecânica quântica. Cartas de Feynman para Leite Lopes (Fevereiro de 1954 e Maio de 1955) revelam também que o primeiro cogitava de "escrever alguns artigos sobre a interpretação quântica de Bohm, para publicá-los no Brasil"; planos estes que não se concretizaram.<sup>76</sup>

Bohm participou do Simpósio Internacional sobre "Novas Técnicas de Pesquisa em Física" realizado em São Paulo e no Rio de Janeiro, entre 15 e 29 de julho de 1952. Após a apresentação do modelo das variáveis "escondidas" vários físicos debateram sua proposta. H. L. Anderson, D. W. Kerst, M. Moshinsky e Leite Lopes perguntaram sobre testes que possam diferenciar a interpretação de Bohm dos resultados obtidos com a interpretação usual. Ele argumentou que sua própria proposta, bem como os meios técnicos disponíveis para a experimentação, precisam ser desenvolvidos para evidenciar tais diferenças. Anderson quis saber sobre a indiscernibilidade das partículas (característica das estatísticas quânticas) e

75. R. P. FEYNMAN - The Present Situation in Fundamental Theoretical Physics, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 26(1), 51-9, 1954.

76. J. LEITE LOPES - Richard Feynman in Brazil: Personal Recollections, *QUIPU*, 7(3), 1990, 383-397.

Bohm respondeu que esta propriedade não é submetida diretamente a testes experimentais e que os resultados que decorrem da indiscernibilidade podem ser obtidos pelo modelo das variáveis "escondidas"; não satisfazendo, contudo, a Anderson. A. Medina perguntou se Bohm podia introduzir o "spin" em sua teoria - aliás a mesma questão foi levantada, no mesmo ano, por Halpern e Takabayasi. Bohm responde que sua teoria não prediz o "spin" mas poderia descrevê-lo através de uma analogia com a equação de Pauli.

A discussão mais acirrada foi com I. I. Rabi. Ele perguntou o que Bohm queria exatamente dizer por uma "partícula"?. E sustentou que não há na proposta das variáveis "escondidas" outras idéias que não as da teoria quântica, querendo dizer com isto que aquela proposta não abria uma perspectiva própria para o desenvolvimento da física. Bohm sustentou que não havia, à época, razões empíricas para decidir sobre a superioridade de uma das interpretações da teoria quântica, e que as críticas feitas por Rabi eram análogas às que os anti-atomistas do século XIX fizeram aos defensores da hipótese atomista.<sup>77</sup>

Bohm publicou com Walter Schützer, físico brasileiro, da USP, uma análise de problemas estatísticos em física e sua relação com a teoria das probabilidades.<sup>78</sup> O objetivo do artigo é mostrar que em certos problemas estatísticos da física é vantajoso, e mesmo necessário, ir além do quadro conceitual presente na teoria das probabilidades.

Bohm e Schützer consideraram como adequada aos problemas estatísticos da física a chamada "interpretação objetiva" mas identificaram insuficiências na versão desta interpretação denominada de "frequência relativa", em especial criticaram a identificação entre probabilidade e frequência relativa. Exemplificando com o lançamento de um dado eles sustentaram que "... a probabilidade é propriedade objetiva do dado mais o processo pelo qual ele é lançado e que manifesta-se aproximadamente como uma frequência relativa em uma longa série de lançamentos." Trata-se de uma antecipação da idéia de que a probabilidade de um evento singular é uma propriedade tanto do objeto quanto das condições experimentais a que o objeto será submetido, desenvolvida por K. Popper e denominada por este de "interpretação da propensão".

Para Popper "[as probabilidades] caracterizam a disposição, ou a propensão, do arranjo experimental provocar certas frequências

77. D. BOHM - Proof that Probability (...), in *Proceedings of New Research Techniques in Physics*, (Rio de Janeiro and São Paulo, July, 15-29, 1952), Rio de Janeiro, 1954, 187-198.

78. D. BOHM and W. SCHUTZER - The General Statistical Problem in Physics and the Theory of Probability, *Nuovo Cimento*, Suppl. ao v. II, n.4, 1004-47, 1955.

características *quando o experimento é repetido muitas vezes*". Assinalando a diferença com a interpretação das "frequências" (puramente estatística), ele afirmou que a interpretação da propensão "considera a probabilidade como uma propriedade mais característica do dispositivo experimental do que da seqüência" de eventos. É digno de nota que Bohm tenha valorizado esta interpretação quando ela foi apresentada à comunidade científica, embora tenha sido cético quanto à sua eficácia para resolver os "problema da mecânica quântica", mas isto provavelmente porque ela estava associada, na defesa de Popper a uma certa interpretação da teoria quântica - teoria estatística mas de base indeterminística - distante das posições sustentadas por Bohm.<sup>79</sup>

Na conclusão do trabalho Bohm - Schützer encontramos o seguinte agradecimento, indicativo de discussões ocorridas quando de sua elaboração: "Nós desejamos agradecer ao Professor Mario Schönberg, ao Dr. Mario Bunge e a J.A. Meyer por muitas discussões estimulantes e instrutivas, as quais desempenharam um papel muito importante na clarificação de nossas idéias."<sup>80</sup>

Ao longo do nosso estudo ficou ressaltado que a sociedade brasileira foi capaz de acolher o cientista e cidadão perseguido politicamente, e assegurar a continuidade de seu trabalho científico, apesar de condições nacionais - políticas, científicas e educacionais - adversas. A ciência brasileira muito se beneficiou do ensino, pesquisa e da permanente preocupação com os fundamentos da física, características da obra de David Bohm.

79. Bohm participou do Simpósio realizado em 1957, em Bristol, onde o trabalho de Popper foi apresentado. Ele declarou, logo após a exposição: "... penso que em alguns casos existem vantagens em falar sobre propensões. (...) Neste sentido parece ser uma contribuição distinguir entre propensão e frequência relativa". Mas considerou que a dualidade onda - partícula é tão difícil de ser tratada na interpretação da propensão quanto em qualquer outra. A familiaridade de Bohm com as questões da interpretação da probabilidade ficou evidente quando a sua intervenção sobre questões bastante técnicas - correlação da propensão com a "escola axiomática" de Kolmogoroff - foi acolhida favoravelmente na intervenção final de Popper. Para o trabalho de Popper e o debate que se seguiu ver K.R. POPPER - The propensity interpretation of the calculus of probability, and the quantum theory, in S. Kormer - *Observation and Interpretation*, op.cit, pp.65-70 e 78-89.

80. Meyer posteriormente saiu do Brasil vindo a assumir a direção do Laboratório da Física Nuclear de Altas Energias da Escola Politécnica de Paris.

Anexo: Carta de Albert Einstein a Getúlio Vargas. Aos cuidados de Abrahão de Moraes. Fonte: Archives Einstein.

24 de maio de 1952

Dr. Getúlio Vargas  
Presidente da República do Brasil  
Rio de Janeiro, Brasil

Caro Sr. Presidente

O Professor Abrahão de Moraes sugeriu-me que podem surgir circunstâncias nas quais seria desejável uma carta, em favor do Dr. David Bohm, dirigida ao Presidente do Brasil. Esta carta é o resultado desta sugestão.

Dr. Bohm, que eu conheço há vários anos, é, na minha opinião, um físico teórico muito destacado e original. Profissionalmente ele tem contribuído para o crescimento do nosso conhecimento da mecânica quântica e, mais recentemente, tornou-se muito interessado nas implicações filosóficas fundamentais daquela teoria. Ele é também um professor excepcionalmente capaz e uma fonte de inspiração para seus alunos.

Eu acredito que saiba que Dr. Bohm teve algumas dificuldades políticas nos Estados Unidos. Eu não tenho nenhuma hesitação em afirmar que, na minha opinião, aquelas dificuldades, que resultaram da tensa situação do pós guerra, em nada dizem respeito ao caráter moral do Dr. Bohm. Eu tive no passado, e continuo a ter, a mais elevada confiança nele, tanto como cientista como pessoa.

Respeitosamente,

Albert Einstein.

Texto original da carta Eintein - Vargas.

Dear Mr. President:

It has been suggested to me by Professor Abrahão de Moraes of the University of São Paulo that circumstances might arise in which a letter from me addressed to you on behalf of Dr. David Bohm would be desirable. This letter is a result of that suggestion.

Dr. Bohm, whom I have known personally for some years, is, in my opinion, a very gifted and original theoretical physicist. Professionally, he has added materially to our knowledge of quantum mechanics and has more recently become very interested in the fundamental philosophical implications of that theory. He is also an exceptionally able teacher who is an inspiration to his students.

I believe that you have heard that Dr. Bohm has had some political difficulties in the United States. I have no hesitation in stating that, in my opinion, those difficulties, which were the result of the tense situation after the war, have no bearing whatsoever on Dr. Bohm's moral character. I have had in the past the greatest confidence in him, both as a scientist and as a man, and I continue to do so.

Respectfully yours,

Albert Einstein.

Agradecemos a A.I. Hamburger, O. Pessoa Jr., S. Barros, A. Buonicore, P. de Oliveira, pelas sugestões e aos Archives for the History of Quantum Physics (La Vilette - Paris), pelas consultas. M. Paty agradece aos Archives Einstein o acesso às correspondências Einstein - Bohm. O. Freire Jr. foi parcialmente subsidiado pela CAPES e CNPQ.

Olival Freire Jr. é professor da UFBA, realizou Mestrado em Ensino de Física, pela USP, e desenvolve pesquisa sobre história da física quântica.

Alberto Luiz da Rocha Barros é professor do Instituto de Física da USP, trabalhou com David Bohm e Basil Hiley, sendo "Researcher Fellow" do Birbeck College, University of London, integra o Conselho Editorial de "Estudos Avançados".

Michel Paty é diretor da Equipe REHSEIS - CNRS, professor da Université Paris 7. É autor de "Einstein, philosophe", PUF, Paris, 1993. Foi professor visitante do Instituto de Estudos Avançados.