Parte I - História da teoria quântica – desenvolvimentos e fundamentos

A descoerência emerge: os múltiplos caminhos de um novo fenômeno físico

Fábio Freitas

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.

A descoerência emerge: os múltiplos caminhos de um novo fenômeno físico

Fábio Freitas

1 Introdução

A Teoria Quântica encontra-se numa situação única na história da ciência. Desde seu estabelecimento formal, em fins da década de 1920, sua aplicação nos mais diversos domínios tem se mostrado absolutamente bem sucedida, mesmo nas mais extremas situações, e seu desenvolvimento permitiu a chamada revolução da informação em fins do século XX, de modo que inquestionavelmente é a teoria física mais bem sucedida de todos os tempos e com maior impacto social e tecnológico. Todavia, nesses mais de 80 anos, desenvolveu-se uma controvérsia, às vezes mais branda, porém muitas vezes extremamente intensa, sobre qual o significado dessa teoria, que imagem de mundo ela nos permite formar ou, mesmo, se nos permite formar alguma imagem de mundo¹. Essa controvérsia, ademais, também tem características únicas. Não é a primeira vez que se discute, ao longo dos anos, o significado de uma teoria, porém é raro o caso de uma controvérsia gerar frutos tão importantes para o próprio desenvolvimento da teoria. Na busca de se compreender melhor os fundamentos dessa teoria, o desenvolvimento de resultados formais levou à identificação e ao evidenciamento experimental de dois novos fenômenos: o emaranhamento e a descoerência. Este trabalho, cujos resultados preliminares são aqui apresentados, concentra-se em desenvolver a história de um deles, a descoerência², focando nos diversos caminhos através dos quais se chegou ao seu estudo. Mas antes de explicar melhor a sua importância, vamos traçar um panorama histórico do desenvolvimento do campo da controvérsia.

1 Confira Freire Jr. e Freitas (2006).

2 Na literatura, em língua portuguesa, também se usa o termo decoerência.

2 Breve histórico da controvérsia sobre os fundamentos da Teoria Quântica

O primeiro destes dois fenômenos, o emaranhamento entre sistemas quânticos, também conhecido como ação fantasmagórica a distância, seguindo a terminologia de Einstein, tem prometido aplicações em criptografia quântica e o desenvolvimento de computadores quânticos. Tendo suas origens nas críticas de Einstein à incompletude da Teoria Quântica, em 1935, foi somente cerca de três décadas depois, por meio das mãos de John Bell e posteriormente mergulhando nos experimentos, que o emaranhamento começou a se estabelecer como uma propriedade efetiva do mundo quântico. (BELL, 1964; EINSTEIN; PODOLSKY; ROSEN, 1935) Do ponto de vista clássico, essa característica é tão surpreendente que, recentemente, a escritora Louisa Gilder batizou seu livro sobre a história da Mecânica Quântica de *Age of entanglement: when quantum physics was reborn*. De fato, esse fenômeno, que emerge na década de 60, tem sua história já razoavelmente bem estudada, desde as motivações que levaram os físicos a prestar mais atenção a essas propriedades, até os caminhos que levaram à efetivação dos experimentos realizados, e à análise desses resultados experimentais, que terminariam por confirmar a Mecânica Quântica em testes extremamente rígidos.³

O segundo resultado teórico também tem suas origens em críticas de um dos pais fundadores da Mecânica Quântica, o austríaco Erwin Schrödinger. No mesmo ano de 1935, seguindo o debate gerado com o trabalho de Einstein, Schrödinger desenvolve o seu caricatural experimento de pensamento do gato que leva o seu nome e é tradicionalmente visto como um símbolo da própria Teoria Quântica.⁴ Em sua crítica, ele enfatiza o problema da aplicação da teoria a sistemas macroscópicos, problema que quando enfrentado posteriormente leva à proposição do mecanismo da descoerência. Todavia, sua história é bastante diferente daquela do emaranhamento. Enquanto o emaranhamento apareceu como carro-chefe do ressurgimento e institucionalização da pesquisa em fundamentos da Física, durante as décadas de 60 e 70, a descoerência permaneceu fora dos circuitos principais de debate até fins da década de 80, tendo seu nome atual sido cunhado para o grande público da Física apenas em 1991. Mas a principal diferença é o processo pelo qual o estudo da descoerência se consolidou. Ao invés de pesquisadores trabalhando em contato e colaborando uns com os outros sobre os avanços da pesquisa, o estudo da descoerência surgiu (e ressurgiu) a partir de três

3 Para a história do emaranhamento, ver Freire Jr. (1999), Freire Jr. (2004), e, especialmente, Freire Jr. (2006). Para o livro de Gilder, ver Gilder (2009).

4 Para o texto original, ver Schrödinger (1980). Ver ainda, Moore (1994).

diferentes grupos de modo independente, cada qual com formações específicas e enfrentando problemas físicos distintos.⁵

3 Descoerência

A descoerência, por si só, não é exatamente algo novo. Sua ideia básica está relacionada ao fato de que um sistema quântico que não esteja isolado do meio-ambiente terá propriedades completamente distintas daquelas de um sistema isolado, mais especificamente perdendo o comportamento dito quântico, que exibiria interferências, e passando para um comportamento clássico, cujas propriedades tipo posição e trajetória⁶ estariam simultaneamente bem definidas. Como alguns pesquisadores já argumentaram, é possível identificar, em diversos momentos na História da Quântica, sugestões de que a interação de um sistema com o meio-ambiente, ou em outras palavras, o fato de trabalharmos com um sistema aberto, levaria a tais consequências.⁷ Todavia, foi somente após os trabalhos de Dieter Zeh e posteriormente de Wojciech Zurek, além de Anthony Leggett e Amir Caldeira, que este tema de fato mereceu a atenção da comunidade dos físicos.⁸ Atualmente, o seu papel em fundamentos da Física é bastante amplo, indo desde o problema da medição, a transição quântico-clássico até

5 Todavia, aparentemente essa situação não é única na história da ciência. Evelyn Fox Keller, em um par de artigos, sugere uma nova abordagem à história da emergência do conceito de auto-organização na ciência. Em sua descrição, esse conceito teria passado por três fases ou caminhos distintos entre si: um primeiro caminho ocorreu dentro da Biologia, sendo seguido pelas pesquisas em Engenharia e Cibernética e, por fim, emergindo dentro da Física, caminho pelo qual esse conceito se estabeleceu contemporaneamente. (KELLER, 2008, 2009).

6 Mas não exclusivamente estas. (Cf. SCHLOSSHAUER, 2007)

7 Castagnino, Laura e Lombardi, por exemplo, identificam van Kampen, van Hove e Daneri, Loinger e Prosperi como pioneiros nessa abordagem nas décadas de 50/60. Stamp, por sua vez, aproxima essas ideias das origens da teoria propriamente dita ao incluir London e Bauer, e Von Neumann na década de 30. Por fim, Bacciagaluppi nos remete à década de fundação da Teoria Quântica, em 1929, com o trabalho de Mott sobre trajetórias de partículas alfa numa câmara de bolhas. A respeito, ver Castagnino, Laura e Lombardi (2008), Stamp (2006), Bacciagaluppi (2007).

8 Em relação a Zeh como pioneiro *de facto*, não parece haver muita discordância, bem como ao papel desempenhado por Zurek. Ver, por exemplo, Bacciagaluppi (2007). Porém, em relação ao papel de Caldeira e Leggett, estes são tradicionalmente desconsiderados, ainda que mais recentemente esse panorama parece ter mudado. Para trabalhos que não citam Caldeira e Leggett, explicitamente na história da descoerência, ver Auletta, (2001) e Schlosshauer e Fine (2007). Para trabalhos que já mencionam explicitamente Caldeira e Leggett, ver Stamp (2006) e Camilleri (2009). Todavia, esse último trabalho é concentrado nos personagens Zeh e Zurek, indicando que uma história extensiva da descoerência permanece por ser escrita.

temas ligeiramente mais afastados, como a direção preferencial da seta do tempo. Todavia, a profundidade do papel da descoerência nestes debates ainda permanece um tema controverso.⁹

O primeiro destes pesquisadores foi o alemão H. Dieter Zeh. Em um contexto no qual a Alemanha tentava se restabelecer no cenário científico internacional, após o fim da II Guerra, o tema central para tal desenvolvimento dentro da Física foi o estudo da estrutura nuclear, especialmente importante por questões energéticas e mesmo bélicas. Esse tema também era central pela presença de Hans Jensen, agraciado com o prêmio Nobel por seu trabalho nesse campo, em 1963, e que durante a guerra desenvolveu pesquisas que teriam sido utilizadas nos esforços de construção da bomba atômica alemã (WALKER, 1989). Jensen era professor na Universidade de Heidelberg, *alma matter* de Zeh. Tendo terminado o seu doutorado e sua habilitação em Física nuclear, em 1961 e 1966 respectivamente, ambas em Heidelberg, Zeh começa um processo de transição da pesquisa aplicada para o campo de Fundamentos da Física. Como consequência de seu trabalho de 1966, Zeh imaginou um núcleo que fosse tão grande, com tantos graus de liberdade, que ele mesmo pudesse se observar ou, em outras palavras, que o próprio núcleo pudesse registrar “propriedades” dele mesmo, servindo como objeto e sistema de medição. Essa situação hipotética servia para tentar compreender, a partir de novas bases, o problema do colapso de função de onda, como exemplificado pelo Gato de Schrödinger. A partir deste panorama, Zeh pôde criticar as diversas abordagens a esse problema, inclusive a desenvolvida pelos físicos italianos Adriana Daneri, Angelo Loinger e Giovanni Maria Prosperi, conhecida na literatura como DLP. Essa abordagem levava o apoio do físico belga Léon Rosenfeld, que dedicara grande parte de sua carreira aos Fundamentos da Física, servindo como assistente filosófico de Niels Bohr, pai da interpretação ortodoxa da Teoria Quântica.¹⁰ Quando terminou o manuscrito do artigo, Zeh o entregou para seu professor, Jensen. Como Jensen nunca se dedicara às questões de fundamentos, enviou para o editor da *Nuclear Physics*, que também era seu amigo: Léon Rosenfeld.

Tendo em vista o passado de Rosenfeld, que em outras oportunidades se envolveu fortemente para coibir críticas à interpretação dominante da Teoria Quântica¹¹, não vem a ser grande surpresa que este não tivesse dado apoio ao trabalho de Zeh, muito pelo contrário. Na resposta de Rosenfeld para Jensen, Rosenfeld disse que tinha todos os motivos para acreditar que, com referência ao

9 Ver Stamp (2006), Bacciagaluppi (2007), Schlosshauer (2004) e Pessoa Jr., (1998).

10 Para mais detalhes sobre a história da abordagem DLP e controvérsias anteriores nas quais ela esteve envolvida, ver Pessoa Jr., Freire Jr. e Greiff (2008).

11 Ver Pessoa Jr., Freire Jr. e Greiff (2008, nota 9) e Osnaghi, Freitas, Freire Jr., (2009).

manuscrito de Zeh, “[...] tamanha concentração da mais absurda falta de senso”¹² não fora escrita com o consentimento de Jensen e que tinha certeza que este não permitiria que esse tipo de coisa continuasse a acontecer em Heidelberg. De fato, Jensen se empenhou em impedir que isso acontecesse em seu instituto. Na medida em que Zeh continuasse a publicar sobre Física Nuclear, ele seria mais do que bem vindo, porém não deveria insistir nessas faltas de sentido. Todavia, Zeh insistiu. Apesar de o manuscrito ter sido recusado em duas revistas, mediante a intervenção do então prêmio Nobel, Eugene Wigner (que curiosamente havia compartilhado o prêmio com Jensen), o artigo foi finalmente aceito por uma recém-lançada revista, *Foundations of Physics*.¹³ Em função desse episódio, a carreira de Zeh seria fortemente afetada pela perda do apoio do físico mais poderoso de Heidelberg. De fato, Zeh declararia, posteriormente, que sua transição definitiva para o campo de fundamentos só veio a acontecer quando ele percebeu que não mais teria como desenvolver uma carreira, portanto, passaria a se dedicar ao que ele gostava. Durante os anos seguintes permaneceu publicando em boletins e em revistas com baixo prestígio, de modo que sua importância no campo somente seria reconhecida após sua aposentadoria.

O segundo caminho pelo qual o tema da descoerência aparece na comunidade científica é pelas mãos do brasileiro Amir Caldeira, junto com seu orientador, Anthony Leggett. Graduou-se em Física nos áureos tempos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), onde ingressou em 1970 com o objetivo de tornar-se engenheiro; porém, o contato com o ambiente de pesquisa e a sua aptidão para o campo levaram-no a desviar para a área de Física. Em 1976, ele terminou o mestrado na mesma instituição, sob a orientação de Nicim Zagury, trabalhando sobre o efeito de dissipação em sistemas quânticos. Este trabalho em Física básica não apresentava nenhuma relação direta com o campo de fundamentos. Todavia, a habilidade que desenvolveu no estudo de efeitos de dissipação serviu, mais tarde, como uma luva nos projetos de Leggett, professor na Universidade de Sussex, Inglaterra, onde Caldeira decidiu ir fazer o seu doutorado. Em 1977, quando ingressou em Sussex, Leggett já era um físico renomado, tendo resolvido o problema da superfluidez do hélio 3, trabalho pelo qual ganharia o prêmio Nobel em 2003. Além de ser um talentoso físico teórico, Leggett tinha uma faceta menos conhecida: era um ferrenho crítico da Teoria Quântica, que acreditava se mostraria inadequada quando aplicada a novos domínios. O seu já

12 Carta de Léon Rosenfeld para Hans Jensen, 14 de fevereiro de 1968. Niels Bohr Archives. Essa carta foi identificada a partir de entrevista realizada com H. Dieter Zeh, em julho de 2008, pelo autor e recuperada por Anja Jacobsen. As informações subsequentes sobre a carreira de Zeh estão presentes nesta entrevista.

13 Para o papel de Wigner na controvérsia sobre fundamentos da Teoria Quântica, ver Freire Jr. (2007). Ver ainda Pessoa Jr., Freire Jr. e Greiff (2008, nota 9), para o papel de Wigner em um debate anterior envolvendo a abordagem DLP. Para o artigo de Zeh, ver Zeh (1970).

mentionado trabalho sobre o hélio 3, que mais tarde se mostrou ser uma das mais impressionantes confirmações do poder heurístico da Teoria Quântica, tinha na sua origem a busca de falhas nessa mesma teoria. Leggett conta que a fase superfluida do hélio 3 era uma situação extrema e rara e que a Teoria Quântica nunca havia sido testada em tais condições. Quando começou a enfrentar o problema, ele tinha certeza de que a Mecânica Quântica não conseguiria explicar fenômeno tão específico. Claramente, como mostrou seu trabalho, suas expectativas iniciais não se concretizaram, porém o espírito de manter-se buscando situações em que a Teoria Quântica falharia permeou o resto de sua carreira e ainda hoje está presente em suas motivações¹⁴.

Um ano após ter chegado a Sussex, em 1978, Leggett sugeriu um problema de pesquisa para Caldeira. Ele propôs que fosse examinada a ocorrência de mudança de estados no fluxo magnético em um dispositivo *squid*¹⁵ devido à flutuação térmica. Esse problema era perfeito para Caldeira, pois como havia trabalhado com dissipação no seu mestrado, agora aplicaria as mesmas técnicas, mas em um problema distinto. De fato, isso foi extremamente frutífero, pois os resultados encontrados, após dois anos de cálculos, indicaram que o efeito definitivo de um banho termodinâmico era a supressão do efeito de tunelamento na junção Josephson, um dos elementos do *squid*. Em termos mais simples, o que Caldeira e Leggett haviam encontrado era que o meio-ambiente servia para fazer desaparecer as propriedades quânticas do sistema, aproximando-o de um sistema clássico. Leggett, com seu interesse em fundamentos da Teoria Quântica e em mostrar que essa teoria apresentava limitações, logo percebeu que esse fenômeno teórico se assemelhava ao famoso paradoxo do gato de Schrödinger, no qual um gato é colocado em um estado de sobreposição quântica e por um ato de medição deveria voltar a se tornar um gato clássico, vivo ou morto. Leggett notou que o papel exercido pelo meio-ambiente poderia se assemelhar a um ato de medição, pois seus efeitos eram idênticos: transformar um sistema essencialmente quântico em um sistema clássico¹⁶.

14 Essas informações constam em entrevista realizada com Amir Caldeira em janeiro de 2009, pelo autor e Olival Freire Jr., e entrevista realizada com Anthony Leggett, em fevereiro de 2009, pelo autor e Osvaldo Pessoa Jr.

15 Squid, acrônimo do inglês para Dispositivos Supercondutores de Interferência Quântica, são pequenos dispositivos de medida de campos magnéticos extremamente sensíveis. Os primeiros Squids foram construídos em fins da década de 1960, baseados no efeito Josephon, teoricamente previsto em 1962, que previa a ocorrência de tunelamento de um par de Cooper em uma junção de semicondutores separados por uma fina barreira isolante.

16 Ver, por exemplo, “[...] a minimum condition is that the system be not ‘observed’ over a time at least of the order of the period of the resonance oscillation, and macroscopic systems such as SQUIDS, in strong distinction to atoms, interact so strongly with their environment that this condition is by no means trivial to realize.” (LEGGETT, 1980, p. 80-100).

Em 1996, um dos mais importantes grupos experimentais do mundo em Óptica Quântica, liderado por Serge Haroche, da École Normale Supérieure, Paris, anunciou que conseguiu medir o tempo de perda de coerência, isto é, em quanto tempo um sistema deixa de apresentar propriedades tipicamente quânticas para começar a se comportar classicamente, após estar imerso em um meio com o qual interage de modo incontrolável. Para desenvolver a teoria concernente a este experimento, Luiz Davidovich, físico brasileiro e responsável pelo desenvolvimento teórico no grupo, utilizou um resultado que estava presente em um dos artigos oriundos da interação entre Caldeira e Leggett, publicado em 1985.¹⁷ Todavia, entre o surgimento do resultado teórico e o seu uso em experimentos, foi necessário convencer a comunidade de físicos sobre a importância do tema, o que ficou a cargo do terceiro “descobridor” da descoerência, o físico polonês Wojciech Zurek.

Zurek graduou-se em Física na Polônia, sem nenhum interesse particular em fundamentos da Teoria Quântica.¹⁸ Após a graduação, ele decidiu fazer doutorado nos Estados Unidos. Dos muitos centros de excelência na Física americana, ele decidiu por Austin por um motivo peculiar: seus pais, que eram médicos, tinham amigos na universidade. Essa escolha terminou sendo um grande golpe de sorte, pois, durante o doutorado, Zurek se interessaria por três temas: Termodinâmica, tema no qual completaria sua tese de doutoramento, Cosmologia e Fundamentos da Teoria Quântica. O interesse nesses dois últimos temas o levaria a se aproximar de John Archibald Wheeler, então aposentado da Universidade de Princeton e já atuando na Universidade do Texas, em Austin, onde montou o seu Instituto de Física Teórica. Wheeler havia conquistado seu prestígio, inicialmente, por trabalhos em Física Nuclear, em especial pelo seu modelo do núcleo, desenvolvido em parceria com Niels Bohr. Posteriormente, durante as décadas de 50 e 60, ele viria a se dedicar à Cosmologia, tendo sido responsável pelo aumento do prestígio desse campo junto à comunidade de físicos. Ao ingressar na Universidade do Texas, Wheeler passou a se dedicar ao campo de Fundamentos de Física, em especial ao problema da medição. Em 1978, ministrou um curso sobre esse problema, revisitando a literatura clássica e os novos desenvolvimentos conceituais e técnicos. Esse curso, que continuaria a ser ministrado nos anos seguintes, viria a dar origem ao volume *Quantum Theory and Measurement*, no qual foram republicados alguns dos mais importantes artigos e textos em fundamentos da Teoria Quântica. Para organizar o volume, Wheeler contou com a ajuda de um estudante da disciplina: Wojciech Zurek. De fato, o envolvimento de Zurek foi muito além da organização do volume. Quando aluno na primeira turma do curso, Zurek

17 Para maiores informações, ver Davidovich e outros (1993, 1996). O artigo original é Caldeira e Leggett (1985).

18 Essas informações constam na entrevista realizada com Wojciech Zurek, fevereiro de 2009, pelo autor.

desenvolveu como ensaio de conclusão uma ideia na qual ele tentava resolver o problema do Gato de Schrödinger. Ao fazer um átomo de prata passar por um dispositivo do tipo Stern-Gerlach, Zurek imaginou um “demônio” que observaria por qual trajeto quântico possível o átomo passou e quais seriam os efeitos da presença deste demônio nos resultados possíveis do experimento. Efetivamente, esse demônio imaginado, que deu origem ao artigo de Zurek de 1981, é um experimento de pensamento equivalente aos trabalhos de Zeh e Caldeira e Leggett.¹⁹ Todavia, viria a ser Zurek quem publicaria a peça “publicitária” definitiva para o estabelecimento do meio-ambiente como observador no mundo quântico: um artigo na revista *Physics Today*.²⁰

Editada pelo *American Institute of Physics*, a referida revista funciona como um instrumento de comunicação não (super) especializado da Física americana e mundial. Como, hoje em dia, os campos de pesquisa estão cada vez mais distantes entre si, os esforços desenvolvidos em um campo específico são comunicados aos pesquisadores de outros campos por meio de revistas como esta, sendo a *Physics Today* a mais importante²¹. Um bom artigo nela publicado pode servir para estabelecer algo no imaginário dos físicos e foi isso que Zurek conseguiu fazer com seu artigo de 1991: estabelecer uma aplicação da Mecânica Quântica como sendo um fenômeno com autonomia própria e merecedor das manchetes, dos pesquisadores e de trabalhos experimentais. A partir de então, o termo descoerência tornou-se parte integrante da Física, diretamente relacionado ao problema da medição, à emergência das propriedades clássicas e à seta do tempo, além de, naturalmente, à sua aplicação mais importante: os computadores quânticos.

O projeto cujos resultados preliminares apresentamos aqui tem como objetivo delinear o desenvolvimento da pesquisa sobre o efeito descoerência ou, melhor dizendo, traçar os diversos caminhos por meio dos quais a relação entre sistemas quânticos distintos, um sendo o meio-ambiente e outro o sistema quântico tradicional, começou a ser estudada; e como esse tipo de estudo pôde estabelecer um novo fenômeno, com nome e campo de pesquisa próprios. Além disso, tendo-se que cada um destes caminhos ocorreu em ambientes distintos - o primeiro na Alemanha dos anos 60/70, o segundo na Inglaterra/Brasil dos anos 70/80 e o último nos Estados Unidos dos anos 80 -, este estudo pretende compreender o impacto que estes diferentes ambientes de pesquisa tiveram sobre

19 Zurek, W. Measurement as a phenomenon. Ms. 1978. Folder PHY394T Quantum Theory of Measurement, BOX CDL 3 9.7/2008-164/13, *Wheeler's Papers*, Center for American History. e Zurek (1981).

20 Para o livro, ver Wheeler e Zurek (1984). Para o artigo, ver Zurek (1991).

21 O fator de impacto da *Physics Today* é 5.1. Em termos de comparação, é a segunda colocada; *Physics World*, editada pelo Institute of Physics da Grã-Bretanha, tem fator de impacto de 0.8.

o desenvolvimento e a carreira de cada um desses pesquisadores²². Outro ponto importante desse projeto se refere ao imaginário dos físicos e como estes constroem as imagens que descrevem a evolução e formação do seu campo. Apesar dos artigos de Caldeira e Leggett acumularem mais citações que a soma dos artigos dos outros pioneiros do campo e de seus resultados teóricos serem referidos diretamente quando da realização dos primeiros experimentos, seus nomes não constam normalmente no imaginário da história da descoerência, sendo suas contribuições, de certo modo, ignoradas na área de Fundamentos da Física. Neste estudo, pretendemos compreender porque suas contribuições foram excluídas desse imaginário, mesmo sendo, um deles, um prêmio Nobel em Física. Um último ponto importante é verificar de que modo essa história está de acordo com a descrição historiográfica do campo de pesquisa em Fundamentos da Física na segunda metade do século XX, contrastando em especial com as descrições de Freire e Bromberg.²³

Referências

AULETTA, G. *Foundations and Interpretations of Quantum Mechanics: in the light of a critical-historical analysis of the problems and of a synthesis of the results*. Singapore: World Scientific, 2001.

BACCIAGALUPPI, G. Probability, arrow of time and decoherence. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 38, issue 2, p. 439-456, jun. 2007.

BACCIAGALUPPI, G. The role of decoherence in quantum mechanics. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 23 aug. 2007. Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/>>.

BELL, J. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*, v. 1, n. 3, p. 195-200, 1964.

BROMBERG, J.L. Device physics vis-a-vis fundamental physics in Cold War America: the case of quantum optics. *ISIS*, v. 97, n. 2, p. 237-259, 2006.

22 Para discussão do papel do ambiente de pesquisa, ver Forman (1971). No contexto da pesquisa em fundamentos da Teoria Quântica, ver Freire Jr. (2005). Harvey (1980, 1981), Kaiser (2007) e Olwell (1999).

23 Para as descrições de Freire sobre o desenvolvimento do campo na segunda metade do século XX, ver além das obras citadas, Freire Jr. (2009). Para Bromberg, ver seus textos de 2004 e 2006. Ver ainda Freitas e Freire Jr. (2003) e Pinch (1977).

_____. *The rise of experimental metaphysics' in late twentieth century physics*. 2004. Unpublished manuscript.

CALDEIRA, A.; LEGGETT, A. Influence of damping on quantum interference: An exactly soluble model. *Physical Review A*, v. 31, p. 1059-1066, 1985.

CAMILLERI, K. A history of entanglement: decoherence and the interpretation problem. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, issue 4, p. 290-302, dec. 2009.

CASTAGNINO, M.; LAURA, R.; LOMBARDI, O. A general conceptual Framework for decoherence in closed and open systems. *Philosophy of Science*, v. 74, n. 5, p. 968-980, 2008.

DAVIDOVICH, L. et al. Mesoscopic quantum coherences in cavity QED: preparation and decoherence monitoring schemes. *Physical Review A*, v. 53, p. 1295-1309, 1996.

_____. Quantum Switches and nonlocal microwave fields. *Physical Review Letters*, v. 71, p. 2360-2363, 1993.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?. *Physical Review*, n. 47, p. 777-780, 1935.

FORMAN, P. Weimar culture, causality, and quantum theory, 1918-1927: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment. In: McCORMMAC, Russel (Ed.). *Historical Studies in the Physical Sciences*. Philadelphia: university of Pennsylvania, 1971. v.3, 1-115.

FREIRE, O. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Campinas: CLE, 1999.

FREIRE JR, O. The historical roots of 'foundations of Quantum Physics' as a field of research (1950-1970). *Foundations of Physics*, v. 34, issue 11, p. 1741-1759, 2004.

_____. Orthodoxy and heterodoxy in the research on the foundations of quantum physics: E. P. Wigner's case. In: SANTOS, B. S. (Org.). *Cognitive justice in a global world*. Lanhan: Lexington, 2007.

_____. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965-1982). *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 37, p. 577-616, 2006.

FREIRE JR., O. Quantum Dissidents: research on foundations of quantum theory circa 1970. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, issue 4, p. 280-289, dec. 2009.

_____. Science and exile: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of quantum mechanics. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 36, n. 1, p. 1-34, 2005.

FREIRE JR., O.; FREITAS, F. H. A. Controvérsia Octogenária. *Scientific American*, São Paulo: Duetto, p. 90-97, 1 dez. 2006. (Gênios da Ciência: Quânticos - os homens que mudaram a física, n. 13).

FREITAS, F. H. A.; FREIRE JR., O. Sobre o uso da web of science como fonte para a história da ciência. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 2, n. 1, p. 129-147, 2003.

GILDER, L. *The age of entanglement: when quantum physics was reborn*. New York: Knopf, 2009.

HARVEY, B. The effects of social context on the process of scientific investigation: experimental tests of quantum mechanics. In: KNORR, K. D.; KROHN, R.; WHITLEY, R. (Ed.). *The social process of scientific investigation*. Dordrecht: Reidel, 1980. p. 139-163.

_____. Plausibility and the Evaluation of Knowledge: a case-study of experimental quantum mechanics. *Social Studies of Science*, v. 11, p. 95-130, 1981.

KAISER, D. *American physics and the cold war bubble*. Chicago: Chicago University, 2007.

KELLER, E. F. Organisms, machines, and thunderstorms: a history of Self-Organization, part one. *Historical Studies in the Natural Sciences*, v. 38, n. 1, p. 45-75, 2008.

_____. Organisms, machines, and thunderstorms: a history of Self-Organization, part two. *Historical Studies in the Natural Sciences*, v. 39, n. 1, p. 1-31, 2009.

LEGGETT, A. Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement. *Progress of Theoretical Physics*, v. 69, p. 80-100, 1980.

MOORE, W. *A life of Erwin Schrödinger*. Cambridge: Cambridge University, 1994.

OLWELL, R. Physical Isolation and Marginalization in Physics - David Bohm's Cold War Exile. *ISIS*, v. 90, p. 738-756, 1999.

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

PESSOA JR., O. Can the decoherence approach help to solve the measurement problem? *Synthese*, v. 113, issue 3, p. 323-346, 1998.

PESSOA JR., O.; FREIRE JR., O.; GREIFF, A. de. The Tausk Controversy on the Foundations of Quantum Mechanics: physics, philosophy and politics. *Physics in Perspective*, v. 10, n. 2, p. 138-162, jun. 2008.

PINCH, T. What does a proof do if it does not prove? A study of the social conditions and metaphysical divisions leading to David Bohm and John von Neumann failing to communicate in quantum physics. In: MENDELSON, E. Weingart, P.; Whitley, R. D. (Ed). *The Social Production of Scientific Knowledge*. Dordrecht: Reidel, 1977. p. 171-216. (Sociology of Science, 1).

SCHLOSSHAUER, M. *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*. Berlin: Springer, 2007

_____. Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, v. 76, issue 4, p. 1267-1305, 2004.

SCHLOSSHAUER, M.; FINE, A. Decoherence and the foundations of quantum mechanics. In: EVANS, J.; THORNDIKE, A. S. (Ed.). *Quantum mechanics at the crossroads*. Berlin: Springer, 2007.

SCHRÖDINGER, E. The present situation in Quantum Mechanics: a translation of Schrödinger's "Cat Paradox" Paper. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. 124, p. 323-38, 1980.

STAMP, P. C. E. The decoherence puzzle. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 37, p. 467-497, 2006.

WALKER, M. *German National Socialism and the Quest for Nuclear Power*. Cambridge: Cambridge University, 1989.

WHEELER, J.; ZUREK, W. (Org.). *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University, 1984.

ZEH, H. D. On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, v. 1, p. 69-76, 1970.

ZUREK, W. Decoherence and the transition from quantum to classical. *Physics Today*, v. 44, p. 36-44, 1991.

_____. Pointer basis of quantum apparatus: Into what mixture does the wave packet collapse? *Physical Review D*, v. 24, p. 1516-1525, 1981.