



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS**

THIAGO HARTZ MAIA

**AS HETERODOXIAS QUÂNTICAS E O OLHAR DO
HISTORIADOR: UMA HISTÓRIA DOS USOS DOS
ARGUMENTOS DE NIELS BOHR ACERCA DA MEDIÇÃO
DE CAMPOS QUÂNTICOS (1930-1970)**

SALVADOR-BA

2013

THIAGO HARTZ MAIA

**AS HETERODOXIAS QUÂNTICAS E O OLHAR DO
HISTORIADOR: UMA HISTÓRIA DOS USOS DOS
ARGUMENTOS DE NIELS BOHR ACERCA DA MEDIÇÃO
DE CAMPOS QUÂNTICOS (1930-1970)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, da Universidade Federal da Bahia e da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ensino, Filosofia e História das Ciências, sob a orientação do Prof. Dr. Olival Freire Jr. e co-orientação do Prof. Dr. Saulo Carneiro de Souza Silva.

Com estágio no Laboratoire SPHERE da Université Paris Diderot (Paris 7) sob a supervisão do Prof. Dr. Olivier Darrigol, de outubro de 2012 a julho de 2013, com bolsa do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior da CAPES.

Salvador-BA

2013

CIP - Catalogação na Publicação

M217h Maia, Thiago Hartz
 As heterodoxias quânticas e o olhar do historiador: uma história dos usos dos argumentos de Niels Bohr acerca da medição de campos quânticos (1930-1970) / Thiago Hartz Maia. – Salvador, 2013.
 176 f. : il.

 Orientador: Olival Freire Junior.
 Co-orientador: Saulo Carneiro de Souza Silva.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, 2013.

 1. Física – História. 2. Medição Quântica – Conceito. I. Freire Júnior, Olival, orient. II. Silva, Saulo Carneiro de Souza, coorient. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Universidade Estadual de Feira de Santana. V. Título.

CDU: 530.145

THIAGO HARTZ MAIA

AS HETERODOXIAS QUÂNTICAS E O OLHAR DO HISTORIADOR: UMA
HISTÓRIA DOS USOS DOS ARGUMENTOS DE NIELS BOHR ACERCA DA
MEDIÇÃO DE CAMPOS QUÂNTICOS (1930-1970)

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor
em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia,
e Universidade Estadual de Feira de Santana.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Olival Freire Jr. (orientador)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Prof. Dr. Carlos Ziller Camenietzki
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Nelson Pinto Neto
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

Prof. Dr. Aurino Ribeiro Filho
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Prof. Dr. Elder Sales Teixeira
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

Prof. Dr. Saulo Carneiro de Souza Silva (co-orientador)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

RESUMO

Em 1933, Niels Bohr (1885-1962) e Léon Rosenfeld (1904-1974) escreveram um extenso artigo sobre a medição de campos quânticos. Diversos historiadores afirmaram que esse artigo, apesar de ter sido considerado um clássico na década de 1930, teria perdido sua relevância na década de 1940; segundo tais autores, isso teria ocorrido devido à ascensão de vertentes pragmáticas na pesquisa em física quântica, que viam pouca importância em discussões epistemológicas como aquelas feitas no artigo de 1933.

Nesta tese, analisamos quais físicos leram o artigo de Bohr e Rosenfeld no período de 1933 a 1970. Nós mostramos que, ao contrário do que afirmaram aqueles historiadores, o artigo foi intensamente lido e discutido durante todo esse período. Para chegarmos a tal conclusão, examinamos referências ao artigo feitas em livros, artigos, correspondências, manuscritos, notas de aula e entrevistas que coletamos em arquivos nos Estados Unidos, na França e na Dinamarca. Defendemos, então, a tese de que a emergência de vertentes pragmáticas na física em meados do século XX não alterou a relevância do artigo de Bohr e Rosenfeld para a comunidade de físicos, conforme afirmaram aqueles historiadores, mas alterou sim os modos como o artigo foi lido e como o conceito de medição de campos quânticos foi utilizado por outros físicos em suas próprias pesquisas. Analisamos, em particular, o caso de Bryce DeWitt (1923-2004), um dos seus mais ávidos leitores. Esta história suscita algumas questões sobre o significado de ortodoxias e heterodoxias nas ciências, e nos conduz, nas conclusões desta tese, a uma reflexão acerca dos procedimentos de construção de visibilidade na escrita da História.

Palavras-chave: História da Física; Medição Quântica; Interpretações da Teoria Quântica; Niels Bohr; Bryce DeWitt.

ABSTRACT

In 1933, Niels Bohr (1885-1962) and Léon Rosenfeld (1904-1974) published a large article about quantum field measurements. Several historians stated that, in spite of being considered a classic work during the 1930s, the article lost its relevance during the 1940s. According to them, this change was motivated by the rise of pragmatic stances in quantum physics, which were not interested in the epistemologically minded arguments presented in the 1933 article.

In this PhD thesis, we analyze how Bohr and Rosenfeld's article was read by other physicists between 1933 and 1970. We examine several articles, books, correspondences, manuscripts, lecture notes, and interviews gathered by us in scientific archives in the United States, France, and Denmark. We show that, contrarily to the shared belief among historians of science, the article was considerably read during the entire 1933-1970 period. We suggest that the pragmatic stances that emerged in physics during the mid-20th century did not make the 1933 article irrelevant or obsolete, but rather caused a shift in the way this article was used and interpreted. We pay particular attention to Bryce DeWitt (1923-2004), who was one of most enthusiastic readers of the article. The history that we tell here suggests some questions about the meaning of orthodoxies and heterodoxies in sciences; at the end, we present some reflections about how the visibility of history is constructed in historical discourse.

Keywords: History of Physics; Quantum Measurement; Interpretations of Quantum Theory; Niels Bohr; Bryce DeWitt.

Dedico esta tese de doutorado à minha mãe, Adriana Hartz, e ao meu amigo Reinaldo Faria de Melo e Souza, os melhores primeiros leitores que alguém poderia ter.

Sem o carinho, a dedicação, o incentivo, a leitura cuidadosa e a amizade deles, não somente esta dissertação nunca teria sido possível, como também eu nunca teria chegado até aqui.

Agradecimentos

Durante os últimos anos, convivi com muitas pessoas admiráveis e não poderia deixar de agradecê-las aqui. Assim, agradeço...

Ao meu orientador, professor Olival Freire Jr. Dificilmente eu conseguiria expor aqui em poucas palavras o quanto o admiro e o quanto ele influenciou esta tese. Propus a ele o esboço do que viria a ser esta pesquisa ainda em 2009; sob sua orientação, contudo, o projeto enveredou por novos caminhos, valendo-se de seu conhecimento e inspirando-se na clareza de suas formulações. O projeto nunca teria chegado a esta versão final se não fosse a dedicação tão generosa, paciente, amiga e gentil que tive da parte dele nos últimos anos. Ainda há, entre as suas sugestões, tantas ideias abertas e tantos caminhos possíveis! Sei que sua orientação não finda com a defesa desta tese, e há de perdurar por muitos anos. A ele, deixo aqui o meu muito obrigado!

Ao meu co-orientador, professor Saulo Carneiro. Seu apoio, seu incentivo, seu curso de relatividade geral e suas correções ao meu texto foram muito importantes para a escrita desta tese. Fico particularmente feliz pela interação que pude ter com o seu grupo de cosmologia e pelas discussões que tivemos sobre física, as quais foram fundamentais para que eu mantivesse um contato estreito com esta ciência. Acredito que um doutorando em história da ciência deva ter um co-orientador que seja um cientista, e gostaria de reconhecer aqui o quão importante isso foi para mim.

Ao professor Olivier Darrigol e aos demais membros do laboratório SPHERE da Universidade Paris Diderot (Paris 7), por terem me acolhido em Paris durante o meu estágio de doutorado sanduíche. O professor Darrigol é certamente o maior conhecedor da medição dos campos quânticos e os seus aconselhamentos foram muito importantes para a pesquisa desta tese. Em particular, agradeço-o por ter lido e comentado cuidadosamente uma versão prévia do capítulo 2!

À professora Anja Jacobsen, com quem discuti esse mesmo capítulo da tese. Agradeço pelos comentários críticos (sempre bem-vindos!) e pelas diversas correções a uma versão prévia desse capítulo. Agradeço à professora Martha Cecilia Bustamante, com quem também discuti esse capítulo. Uma pergunta que ela me fez – “Afinal de contas, o que há de tão especial nesse artigo de 1933 que permite que ele tenha tantas leituras diferentes?” – foi muito importante para mim.

Ao professor Carlos Ziller Camenietzki. Os seus cursos da UFRJ foram, para mim, a principal motivação para mudar da física para a história das ciências. Lembro bem da primeira aula que tive com ele, em 2007, sobre o método cartesiano. A minha repulsa nesta tese à ideia (tão tentadora!) de que os usos da medição de campos seriam plurais pelo fato do conceito de medição não ser definido de modo claro e distinto (p. 36 da tese) vem exatamente desta aula. Da sua leitura do

Pietro Redondi vem a ideia de que o olhar é um objeto da historiografia. Agradeço-lhe por ter insistido tanto que eu viesse fazer o meu doutorado na Bahia. Reconhecendo aqui a importância das suas aulas e dos seus conselhos na minha trajetória, tenho de me reconhecer não somente como seu estudante, mas também como seu aluno – ainda que eu saiba que isso o revoltará.

Ao professor Aurino Ribeiro Filho, pelos ensinamentos de física e de história da física, e por ter me enviado por correio em 2008 uma série de artigos e livros de sua autoria. Nunca me esquecerei desse belo ato de generosidade.

Aos professores Nelson Pinto Neto e Elder Sales Teixeira, e aos professores Ziller e Aurino (já mencionados), por terem aceitado participar da banca desta tese e pelos comentários tão construtivos que fizeram sobre a minha pesquisa! Muito obrigado!

Ao professor Manoel Salgado Guimarães (*in memoriam*), com quem dei os meus primeiros passos em teoria da história. As referências a Certeau, Hartog, Payen, Zangara e Valéry vêm de suas aulas.

Ao professor Carlos Farina, mestre e grande amigo, e ao professor Marcus Venicius Cougo-Pinto, por tudo que me ensinaram. Quase tudo que sei de física, aprendi com eles, e deixo aqui o meu mais sincero agradecimento. Em particular, obrigado por insistirem tanto na importância de ler os artigos de Schwinger; hoje vejo como isso foi fundamental para a minha formação. Ao Felipe Siqueira Rosa, ao Tarciro Mendes, ao Mario Neves Jr. e aos demais membros do grupo de Efeito Casimir da UFRJ, por todos os ensinamentos e discussões ao longo dos últimos anos.

Ao professor Alexei Kojevnikov, que fez comentários muito relevantes sobre a minha pesquisa. A tese central do capítulo 2 – a saber, a ideia que o pragmatismo está mais ligado ao uso que se faz de Bohr do que ao fato de se citar ou não Bohr – surgiu em uma conversa que tive com ele em Salvador em julho de 2012.

À professora Cécile Morette-DeWitt, por ter me recebido tão gentilmente em Austin, nos Estados Unidos, e por ter me concedido acesso aos arquivos pessoais de Bryce DeWitt.

Ao cineasta Lars Becker-Larsen, por ter me dado uma cópia de sua entrevista de Bryce DeWitt.

Aos demais alunos do LACIC: Mayane Nóbrega, Indianara Lima Silva, Virgile Besson, Gustavo Rodrigues Rocha, Rodolfo Alves de Carvalho Neto, Climério Silva Neto, Leyla Joaquim, Mário de Jesus Ferreira, Fábio Freitas, José Eduardo Clemente e Caio Fernandes. Com muita alegria, tive a oportunidade de discutir com eles, nas reuniões do grupo, inúmeros pontos da minha pesquisa.

Aos professores do PPGEFHC; em particular, ao professor Charbel Niño El-Hani pelos excelentes cursos. Aos meus colegas Breno Pascoal, Mari Almeida, Priscila Figueiredo, Frederik Moreira dos Santos, Marlize Rêgo e Diego Palmeira. À Inês Freire pelos inúmeros conselhos sobre Paris. Ao pessoal da secretaria do programa, sempre tão prestativo: Marli, Geraldo e Priscila.

Ao meu grande amigo Reinaldo Faria de Melo e Souza, com quem discuti diversas das questões aqui apresentadas. Ele leu muito cuidadosamente incontáveis versões preliminares deste texto, e dificilmente haveria tese se não fossem os seus comentários e seus incentivos. Sua argumentação precisa e sua grande abertura ao diálogo foram fundamentais para a escrita desta tese.

Aos meus amigos tucumãs: Victória Flório, Alexandre Bagdonas e Bruno L’Astorina. A pesquisa aqui apresentada começou numa data específica. Na primeira semana de outubro de 2009, sentado no chão do quarto do Bruno em Copacabana, expliquei a ele e ao Reinaldo as minhas ideias sobre o artigo de Bohr e Rosenfeld. Eu não tinha como saber na época que aquela conversa de horas acabaria sendo o tema do meu doutorado. A eles, o meu muito obrigado.

Os resultados desta tese foram apresentados em duas conferências internacionais – uma realizada em julho de 2011 em College Park, nos EUA, e outra realizada em junho de 2013 em Copenhague, na Dinamarca –, nas quais pude receber inúmeras críticas de excelentes pesquisadores. Assim, agradeço aos professores Paul Forman, Finn Asserud, Gregory Good, Chrisoph Lehner, Christian Joas, Jeroen van Dongen, Henrik Zinkernagel, Svend Rugh, Michel Janssen, Anthony Duncan, Richard Staley e Michael Nauenberg. Aos professores John Stachel e Luis Gerardo Pedraza Saavedra por terem sugerido, por email, diversas referências bibliográficas.

Aos arquivos por mim visitados durante a pesquisa desta tese: Niels Bohr Archive, em Copenhague, Dinamarca; Niels Bohr Library & Archives, em College Park, EUA; Dolph Briscoe Center for American History, em Austin, EUA; American Philosophical Society Library, na Philadelphia, EUA; Centre de Ressources Historiques / ESPCI ParisTech, em Paris, França; Firestone Library, na Universidade de Princeton, EUA; e Mediathèque de la Cité des Sciences et de la l’Industrie, em Paris, França. Agradeço por terem me permitido consultar as suas coleções. Aos arquivistas, diretores e bibliotecários desses arquivos, em particular, Finn Aaserud, Felicity Pors, Lis Rasmussen, Gregory Good, Joseph Anderson, Carol Mead e Charles Greifenstein.

À CAPES, pela bolsa de doutorado e pela bolsa de doutorado sanduíche. Ao American Institute of Physics, pelo auxílio de custo concedido quando da minha ida à conferência “Continuity and Discontinuity in the Physical Sciences Since the Enlightenment”. À CAPES, ao CNPQ, à UFBA e ao LACIC, por terem custeado parcialmente as minhas viagens aos arquivos.

À minha amiga Paula Vieira Campos, pelos incentivos e pela ajuda nas traduções dos textos em alemão. Ao meu amigo Virgile Besson por ter encontrado a referência precisa do panfleto do PCF, a qual eu jamais teria achado sozinho. À minha amiga Priscila Coutinho por todo o apoio; em particular, por ter me ajudado (de todas as formas possíveis!) na correria que foi escrever o projeto para o pós-doutorado e por ter obtido uma cópia do referido panfleto na biblioteca da ENS de Lyon. Ao Adrien Vila Valls pelas discussões sobre a história da física quântica na França.

Aos meus amigos Amanda Bastos, Kiskey Almeida, Elisa Fish, Camila do Valle, Tatiana Versiani, Leonardo Bomfim, Sonia Domont, Gleice Mayer, Tomaz Miranda, Diana Stephan, Carine Rebonatto, Fausto Ventura, Gustavo Sophia, Fernanda Fonseca, Paulo Ferracioli, Lolita Guerra, Felipe Velloso e Isabella Mendes por todo o apoio que sempre me deram.

À minha família. À minha avó Marina, pelo seu amor e sua dedicação! Ao meu avô Hugo, à minha tia Isabela, ao meu primo André. Aos meus irmãos, Claudia e Roberto, e ao nosso pai (*in memoriam*). Por fim, o maior dos agradecimentos. À minha mãe, por todo o amor e toda a dedicação, indizíveis neste papel. Obrigado, mãe!

Espero que todos estes agradecimentos deixem claro que uma tese não é feita a duas mãos, mas a inúmeras; e que, nas entrelinhas dessas palavras, fique claro que a solidariedade, o companheirismo, a camaradagem, o amor e a amizade são as coisas mais importantes da vida.

★ ★ ★

Passada a defesa desta tese, ao fechar o texto final, perguntei-me se eu não teria sido ingrato com algumas pessoas. Ainda que eu não as tenha conhecido pessoalmente, elas foram muito importantes para esta pesquisa e eu lamentava não ter tido a oportunidade de citá-las nas notas de rodapé desta tese. Como a seção de agradecimentos é o único lugar em que um autor é livre para dizer o que bem entender, acho que vale pagar aqui os meus tributos. Sugiro que as palavras a seguir sejam lidas depois da tese, pois acredito que assim elas farão mais sentido!

Cronologicamente, a primeira pessoa foi decerto José Saramago. No livro *O Conto da Ilha Desconhecida*, ele afirma que “gostar é provavelmente a melhor maneira de ter, ter deve ser a pior maneira de gostar”. A releitura desse conto, depois de ter lido Michel de Certeau, que frisa a todo tempo a questão do uso tático dos que não têm nome próprio, conduziu-me à constatação que brincar com um argumento de outrem é a melhor maneira de tê-lo para si, dizer que o tem (reivindicando uma patente) é a pior maneira de usar. Este é, *grosso modo*, o argumento central desta tese.

A profunda relevância de Michel de Certeau no meu modo de ver o mundo vem das aulas do professor Manoel Salgado, já mencionadas nestes agradecimentos, que me apresentou também as obras de François Hartog e de Pascal Payen.¹ Esses dois autores são citados na tese, mas muito brevemente, de modo desproporcional à importância que tiveram para mim.²

¹Hartog, François. **Le miroir d'Hérodote**. Paris: Gallimard, 2001. Payen, Pascal. **Les Anciens en figures d'autorité**. In: D. Foucault & P. Payen (eds). *Les autorités: dynamiques et mutations d'une figure de référence à l'antiquité*. Grenoble: Éditions Jérôme Millon, 2007.

²Espero que as críticas que foram feitas por Carlo Ginzburg à tese de doutorado de Hartog (e, de certo modo, levantadas na qualificação desta tese pelo professor Carlos Ziller) não se apliquem ao meu texto final. Cf. Ginzburg, Carlo.

A ideia de que a compreensão histórica depende crucialmente do recorte temporal é frisada no quarto capítulo desta tese, onde menciono as obras de Fustel de Coulanges, François Hartog e Michel de Certeau. Entretanto, essa ideia apareceu para mim pela primeira vez, ainda que de forma bastante embrionária, em um livro de João Ubaldo Ribeiro – cujas palavras eu poderia ter adotado como a abertura do terceiro capítulo desta tese:

Talvez isto não fique claro ainda por muito tempo, mas o exame consciencioso dos fatos que levaram aos acontecimentos principais deste relato mostra que sua primeira cena se desenrolou em data já um pouco distante, sem que ninguém então pudesse saber o que pressagiava.³

Outra influência fundamental, também lida de modo certauniano, foi uma entrevista de Caetano Veloso ao programa Roda Viva, da TV Cultura, em 1996. Ao ser perguntado por Eduardo Giannetti sobre a possível compatibilização do modo de ser dos brasileiros com os valores fundamentais da civilização européia, Caetano respondeu:

A minha ambição seria de fazer com que uma cultura como a nossa, que está, sob todos os pontos de vista, como que jogada fora da área (...) das vantagens da civilização moderna, porque está no hemisfério sul, porque é mestiça, porque fala português, não apenas uma língua latina do sul da Europa, mas justamente o português, a menos prestigiada de todas elas, (...) um país pobre e, sobretudo, injusto socialmente. Então, todas essas desvantagens, de uma certa forma, deveriam criar em nós uma mera depressão em relação à perspectiva histórica, em relação a prospecções. E, no entanto, a gente tem alguma coisa de alegria e de entendimento da vida, alguma riqueza no modo de ser, que é perceptível, inclusive, para os estrangeiros, que diversas vezes se manifestam a respeito do que eles percebem de interessante, de sugestivo no modo de ser do Brasil e dos brasileiros. [Isso] é um dado cultural, (...) não é um valor universal, abstrato. É um dado cultural, qualitativo do nosso modo de ser, que é do que você está falando. O que desejo não é que isso seja possivelmente fundido com o que você e nós chamamos de civilização. Acho que o que desejo mesmo é que *esse nosso modo de ser tome conta – tome em suas mãos – os dados abstratos universais da civilização e faça deles algo que não tenham feito ainda*, entendeu? Então, é uma ambição grande demais. (...) Mas, enfim, minha pergunta é esta: o que nós podemos fazer com essas coisas?⁴

Ele escrevia, naquela época, o livro *Verdade Tropical* e ainda estava entranhado de tropicalismos; no plural, como Tom Zé sempre insistiu. Quando penso na pluralidade de leituras dos textos bohri-

Checking the Evidence: The Judge and the Historian. Critical Inquiry, v. 18, n. 1, pp. 79-92, 1991, crítica na p. 84.

³Ribeiro, João Ubaldo. **O sorriso do lagarto**. Rio de Janeiro: Editora Record, s/d [1989], p. 9.

⁴Caetano Veloso em entrevista ao Programa Roda Viva, TV Cultura, 23.09.1996. Citação de 15'31" a 17'41".

anos, penso exatamente nesta questão: o que o modo de ser dos físicos da segunda metade do século XX fez com os dados abstratos da física de viés epistemológico europeia? Daí o meu combate à ideia, ao meu ver bastante equivocada, de “apropriação falha da epistemologia” (p. 54 da tese).

A citação de José Murilo de Carvalho ao final do capítulo dois (também na p. 54) tocou-me muitíssimo quando, há alguns anos, a li pela primeira vez. Ela ganhou importância renovada após as manifestações de junho de 2013, às quais assisti de Paris. Toda essa situação foi lida por mim, uma vez mais, com um olhar certeuniano, preocupado em analisar heterologias. Como José Murilo afirmou, “cabe perguntar se não seria o momento de a cidade redefinir a República segundo o modelo participativo que lhe é próprio”.⁵ (Ou seja, voltamos à questão de Caetano!) Esta tese versa sobre a história da física teórica; entretanto, sob o ponto de vista cultural mais amplo, ela busca servir de exórdio a uma reflexão, de caráter pessoal, acerca do atual problema da representatividade política no Brasil. Repensar aquilo que chamamos de democracia é a meta utópica deste trabalho.

Ainda que Tom Zé recuse qualquer influência de Oswald de Andrade ao Movimento Tropicalista, é inegável a importância do Manifesto Antropófago para alguns dos tropicalistas.⁶ No meu pensamento, admito, o papel de Oswald foi enorme. A própria ideia de *apropriação*, com a qual fui me deparar anos mais tarde ao ler historiadores como Roger Chartier e Peter Burke, e que jaz no centro dos argumentos desta tese, já estava bem delineada quando, no ensino médio, li no Manifesto:

Só a antropofagia nos une. Socialmente. Economicamente. Filosoficamente. Única lei do mundo. Expressão mascarada de todos os individualismos, de todos os coletivismos. (...) Contra todas as catequeses. (...) Só me interessa o que não é meu. Lei do homem. Lei do antropófago. (...) Nunca tivemos gramáticas. (...) E nunca soubemos o que era urbano, suburbano, fronteiro e continental. (...) Contra todos os importadores de consciência enlatada. (...) Contra o mundo reversível e as idéias objetivadas. Cadaverizadas. O *stop* do pensamento que é dinâmico. (...) Nunca fomos catequizados. Fizemos foi o Carnaval. O índio vestido de senador do Império. Fingindo de Pitt. Ou figurando nas óperas de Alencar cheio de bons sentimentos portugueses. (...) O mundo não datado. Não rubricado. Sem Napoleão. Sem César. (...) Contra as sublimações antagônicas. Trazidas nas caravelas. Contra a verdade dos povos missionários: (...) É mentira muitas vezes repetida. (...) Antropofagia. (...) Contra a Memória fonte do costume. A experiência pessoal renovada. (...) Somos concretistas. (...) Suprimamos as idéias e as outras paralisias. (...) Absorção do inimigo sacro. Para transformá-lo em totem. A humana aventura. (...) A nossa independência ainda não foi proclamada. Frase típica de D. João VI: – Meu filho, põe essa coroa na tua cabeça, antes que algum aventureiro o faça!

⁵Carvalho, José Murilo de. **Os bestializados**: o Rio de Janeiro e a República que não foi. Rio de Janeiro: Companhia das Letras, 1987, p. 164.

⁶E.g. Duarte, Rogério. **Notas Sobre o Desenho Industrial**. Revista Civilização Brasileira, n. 4, pp. 227-247, 1965.

Expulsamos a dinastia. É preciso expulsar o espírito bragantino.⁷

Foi contra “o *stop* do pensamento que é dinâmico” que escrevi esta tese. Contra o mundo rubricado.⁸ Como disse Glauber Rocha, a “relação antropofágica é de liberdade”.⁹ Como ele sugeriu, “o nosso ‘herói’ deve ser o brasileiro multifacetado, que vive cada crise tal qual ela se lhe apresenta. (...) Se o herói brasileiro não possui caráter – tal qual acredito ser o caso –, se ele se encontra perdido e desorientado, sem tradições ou futuro, como ele deve ser apresentado?”.¹⁰ Os personagens desta tese são todos multifacetados e desorientados, perdidos em meio a tradições, como nós mesmos; em recusa a todo e qualquer projeto totalizante.¹¹

A tese finda com uma reflexão, em termos cereteunianos, acerca da “liberdade gazeteira das práticas”;¹² que fique claro que isso vem mais do Movimento Antropofágico (e do Tropicalismo, do candomblé, do lenço de Antônio das Mortes, da polca de Chiquinha Gonzaga, da lua de Augusto Boal) que dos textos de Michel de Certeau. Sei que o próprio Certeau concordaria comigo.¹³

Nenhuma dessas influências foi mecanicamente transposta à minha pesquisa, mas todas se encontram, em maior ou menor grau, presentes em minhas abordagens. A construção do projeto se deu tacitamente por essa lente. Fico feliz que esta tese tenha sido feita na Bahia, que do Bispo Sardinha ao Tropicalismo sempre foi afeita a deglutições.¹⁴

⁷ Andrade, Oswald de. **Manifesto Antropófago**. Revista de Antropofagia, n. 1, pp. 3-4, maio de 1928.

⁸ A palavra “rubrica” deve ser entendida aqui em seu sentido litúrgico, ou seja, uma nota colocada em vermelho nos textos de orações e salmos a fim de orientar a maneira de dizer ou celebrar o ofício. A rubrica orienta a leitura correta, o bem proceder na liturgia. Como observa Chartier, “o leitor é sempre considerado pelo autor (...) como estando subjugado a um único sentido, a uma interpretação correta, a uma leitura autorizada”. Chartier, Roger. **Text, Printing, Reading**. In: L. Hunt. *The New Cultural History*. Berkeley: University of California Press, 1989, pp. 154-175, citação na p. 156. Ou seja, foi contra o tolhimento dos jovens físicos por parte de Léon Rosenfeld que escrevi esta tese (cf. seção 2.4).

⁹ Rocha, Glauber. **Tropicalismo, antropologia, mito, ideograma** (publicado originalmente em 1969). In: *Id.* *Revolução do Cinema Novo*. São Paulo: Cosac & Naify, 2004, pp. 150-154, citação na p. 151.

¹⁰ Rocha, Glauber. **Beginning at Zero: Notes on Cinema and Society**. *The Drama Review*, v. 14, n. 2, pp. 144-149, 1970, citação na p. 146. O herói sem caráter de Glauber – no sentido de imprevisível, irregular, informe, não afeito a padrões – é claramente uma referência ao Macunaíma de Mario de Andrade. No que se refere à falta de tradições ou futuro (diga-se de passagem, tão visível na angústia de Bryce DeWitt narrada no capítulo três desta tese!), esse trecho de Glauber se aproxima, de modo muito interessante, da análise do regime presentista de historicidade feita por Hartog, François. **Régimes d'historicité: Présentisme et expériences du temps**. Paris: Seuil, 2003.

¹¹ Ou seja, recusei mergulhá-los nas águas frias que mataram Macunaíma (ainda que alguns deles já estivessem habitados a tais águas). Cf. Andrade, Mario de. **Macunaíma**. Rio de Janeiro: MediaFashion (Coleção Folha de São Paulo), 2008, em particular p. 202. Vale lembrar uma imagem de Poe: as águas geladas de um lago se enegrecem ao sugarem as sombras das árvores que sobre ele se debruçam. Poe, Edgar Allan. **The Unparalleled Adventure of One Hans Pfaall**. In: *Id.* *Collected Works: Stories and Poems*. San Diego: Canterbury Classics, 2009, pp. 1-33, em particular p. 19.

¹² Giard, Luce. **Histoire d'une recherche**. In: M. de Certeau. *L'invention du quotidien*, 1. Paris: Gallimard, 1990, pp. i-xxx, expressão na p. xiv. No original, “*liberté buissonnière des pratiques*”, em itálico.

¹³ Cf. Certeau, Michel de. **L'invention du quotidien**, 1. Paris: Gallimard, 1990, em particular, pp. 31-49.

¹⁴ Ainda que tenha morrido em Alagoas, Sardinha foi, vale lembrar, o primeiro bispo da Diocese de Salvador.

Notações

As datas das correspondências são citadas na forma dia-mês-ano — por exemplo, 11.01.1961.

Adotamos as seguintes abreviaturas (de 4 letras) para livros e jornais citados repetidas vezes:

HSNS	Historical Studies in Natural Sciences (periódico, University of California Press)
HSPS	Historical Studies in Phys. and Biol. Sciences (periódico, University of California Press)
NBW6	Kalckar, Jørgen. Niels Bohr Collected Works v. 6. Amsterdam: North-Holland, 1985
NBW7	Kalckar, Jørgen. Niels Bohr Collected Works v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996
SHMP	Studies in History and Philosophy of Modern Physics (periódico, Elsevier)
NGJS	Ng, Y. Jack (ed). Julian Schwinger. Singapore: World Scientific, 1996
PREV	The Physical Review (periódico, American Physical Society)
ROMP	Reviews of Modern Physics (periódico, American Physical Society)
SHPS	Studies in History and Philosophy of Science (periódico, Elsevier)
SPLR	Cohen, Robert & Stachel, John. Selected Papers of Léon Rosenfeld. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. XXI. Dordrecht: D. Reidel, 1979
SQED	Schweber, Silvan. QED and the Men Who Made It: Feynman, Dyson, Schwinger, and Tomonaga. Princeton: Princeton University Press, 1994
TPQG	DeWitt-Morette, Cécile. The pursuit of quantum gravity. Berlin: Springer, 2011

Adotamos as seguintes abreviaturas (de 3 letras) para os arquivos utilizados:

APS	American Philosophical Society, Philadelphia, PA, EUA
CSI	Bibliothèque, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris, França
DBC	Dolph Briscoe Center for American History, University of Texas at Austin, TX, EUA
NBA	Niels Bohr Arkivet, Københavns Universitet, Copenhagen, Dinamarca
NBL	Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD, EUA
UCI	UCI Library, University of California Irvine, Irvine, CA, EUA

Adotamos as seguintes abreviaturas (de 2 letras) para as coleções citadas:

BC, X-Y	Niels Bohr Scientific Correspondence, 1903-1962, NBA, folder X, item Y ¹
BS, X	Niels Bohr Scientific Correspondence (Supp.), 1910-1962, NBA, folder X
DF, X	Bryce S. DeWitt Personal Files, identificação X ²
DM, X	Cécile DeWitt-Morette Personal Correspondence, folder X ³
DP, X-Y, Z	Bryce S. DeWitt Papers, 1946-2006, DBC, series X, box Y, folder Z
EP, X-Y-Z	Hugh Everett III Papers, 1953-1989, NBL, series X, box Y, folder Z
EA, X, Y	Hugh Everett III Addition to Papers, NBL, informação adicional X ⁴
EM, X	Hugh Everett III Manuscripts, UCI, localizador X ⁵
GP, X-Y	Samuel A. Goudsmit Papers, 1921-1979, NBL, box X, folder Y
OH	Oral History Collection, NBL
PC, X	Aage Petersen Collection of Reprints and Manuscripts, NBL, folder X
RP, X-Y-Z	Léon Rosenfeld Papers, 1911-1974, NBA, box X, folder Y, pasta Z
WP, X-Y, Z	John A. Wheeler Papers, 1880-2008, APS, series X, box Y, folder Z

¹ Acessamos a cópia mimeografada pelo projeto *Archive for the History of Quantum Physics* disponível em CSI.

² Obtidos com Cécile DeWitt-Morette, em Austin, Texas. Não estava organizado.

³ Também obtidos com Cécile DeWitt-Morette. Organizado alfabeticamente.

⁴ Quando visitamos o arquivo, esta coleção ainda não estava organizada e inventariada.

⁵ Disponível no site <http://hdl.handle.net/10575/X>, onde X é o localizador.

Índice

Prólogo	2
1 Introdução: sobre a visibilidade das heterodoxias quânticas	5
1.1 As interpretações da teoria quântica como objeto histórico	5
1.2 O problema historiográfico em questão	9
2 Os muitos usos da medição de campos quânticos	14
2.1 O problema histórico em questão	15
2.2 A medição dos campos quânticos segundo Bohr e Rosenfeld	22
2.3 A medição dos campos quânticos após Bohr e Rosenfeld	37
2.4 O que foi feito das ideias de Bohr?	53
3 O argumento virado ponta-cabeça	56
3.1 O estabelecimento do dissenso	56
3.2 DeWitt contra a interpretação de Copenhagen	58
3.3 A narrativa estabelecida	62
3.4 O jovem Bryce Seligman DeWitt (1923-1945)	64
3.5 A tese de doutorado (1946-1950)	68
3.6 As peregrinações de um jovem doutor (1950-1955)	74
3.7 A fundação do instituto de pesquisa em Chapel Hill (1955-1957)	104
3.8 A conferência de Chapel Hill (1957)	106
3.9 A tese de doutorado de Hugh Everett (1957)	108

3.10	A grande ideia de DeWitt (1957-1962)	113
3.11	O confronto com Rosenfeld (1962-1965)	123
3.12	A trilogia de DeWitt (1965-1967)	128
3.13	O rompimento final (1967-1970)	130
3.14	A questão da autoridade de Copenhagen	133
3.15	Crítica da narrativa estabelecida	134
3.16	“A ironia deste capítulo”	137
4	Conclusões: as heterodoxias quânticas e o olhar do historiador	139
	Bibliografia	142

Um certo esforço tem que ser feito para esclarecer em quais pontos há concordância e onde precisamente as discordâncias começam. Essa não é uma tarefa fácil, uma vez que as mesmas palavras significam coisas diferentes para pessoas diferentes.

Rudolf Haag em carta a Léon Rosenfeld, 10.05.1968. RP 4-3-4.

Os acontecimentos são o que mais facilmente se pode apreender dos livros; nós, por outro lado, queremos estabelecer um ponto de vista para os fatos.

Burckhardt, Jacob. **Griechische Kulturgeschichte**, Band 1. Berlin: W. Spemann, s/d, p. 2.

O objetivo seria alcançado se as práticas ou “maneiras de fazer” cotidianas cessassem de figurar como o fundo noturno da atividade social, e se um conjunto de questões teóricas, de métodos, de categorias e de pontos de vista, atravessando essa noite, permitisse articulá-la.

Certeau, Michel de. **L'invention du quotidien**, 1. Paris: Gallimard, 1990, p. xxxv.

Prólogo

Esta tese de doutorado parte da constatação de que a ciência não é uma atividade consensual. Pelo contrário, é repleta de discordâncias, as quais produzem, ao longo do tempo, diversos debates e controvérsias. Para o historiador, a ocorrência de tais litígios é extremamente interessante. Em meio a eles, ficam patentes algumas diferenças de perspectiva dos cientistas em liça que, em outros períodos que não os de disputa, jazem tácitas na prática científica. Essas diferenças, muitas vezes, não se referem somente a assuntos propriamente científicos, mas também transparecem opiniões acerca do que deve ser uma teoria científica. Diferentes concepções de o que é ciência e de como ela deve ser feita são postas assim em evidência. Nesses casos, é possível atentar a como a ciência se relaciona com diversos aspectos culturais, filosóficos, políticos e ideológicos.

A história da física quântica é particularmente repleta de litígios, pois essa teoria, desde o seu surgimento, no início do século XX, apresentou situações de grande dificuldade interpretativa, as quais foram bastante debatidas. Esses episódios históricos compõem um conjunto de disputas que hoje denominamos “as controvérsias dos quanta”. Há atualmente um grande número de estudos históricos sobre esse tema. A pesquisa que será apresentada a seguir se enquadra nesta linha temática, enfocando, em particular, as diferentes maneiras como a medição de campos quânticos – um conceito de física quântica desenvolvido por Niels Bohr e Léon Rosenfeld em um célebre artigo publicado em 1933 – foi compreendida por diversos físicos entre o momento da publicação deste artigo e o ano de 1970. A análise enfocará o modo como esse artigo foi lido e também o modo como seus leitores rephrasearam, utilizaram e, por fim, se apropriaram dos argumentos de Bohr e Rosenfeld, atribuindo-lhe significados plurais e concorrentes.

No início dos anos 1960, dois físicos – Bryce DeWitt e Léon Rosenfeld – discutiram ferrenhamente sobre a medição de campos quânticos. O que estava em jogo era a compreensão acerca do conteúdo do artigo de 1933. DeWitt, sem qualquer intuito de ser heterodoxo, refraseou o artigo em suas próprias palavras, atribuindo-lhe novos significados. Rosenfeld, como um de seus autores, fez questão de frisar qual seria a interpretação correta do texto. Essa controvérsia levou, entre 1967 e 1970, ao rompimento de DeWitt com a interpretação de Copenhague da teoria quântica – que era defendida por Bohr e Rosenfeld. Esse debate será analisado no capítulo 3 desta tese.

Antes, no capítulo 2, mostraremos como diversos outros físicos interpretaram e utilizaram a medição de campos quânticos. Eles fizeram usos extremamente diversificados desse conceito, entretanto, ao contrário de DeWitt de 1967, eles nunca chegaram a reivindicar um rompimento com a interpretação de Copenhague. Eles se diziam fiéis à abordagem bohriana. Entretanto, conforme mostraremos, com as leituras que fizeram do artigo de 1933 e com os usos que eles fizeram do conceito de medição de campos quânticos, esse conceito silenciosamente deslizou, na prática cotidiana da física, rumo a novos significados. Estamos interessados em analisar esse movimento histórico, a fim de ver a derrocada de velhas ideias e a sua reutilização inaudita com novos propósitos.

Esse movimento histórico analisado no capítulo 2 difere das típicas controvérsias científicas, posto que nele os desvios interpretativos não são alardeados. Ocorrem silenciosamente, no uso diário da física. Neste sentido, o texto aqui apresentado é uma reflexão sobre a história cultural das práticas cotidianas. Estamos preocupados com os usos cotidianos, as alterações minúsculas, as heterodoxias microscópicas. Estamos interessados em compreender como conceitos científicos erodem com o uso ordinário.

Ordinário não significa “normal” tal qual entendido por Kuhn. O conceito kuhniano de ciência normal não se aplica ao nosso objeto de estudo. Conceitos que erodem pelo uso não são sistemas paradigmáticos estáveis. Ao entrarmos no pântano do cotidiano, do pequeno, do desprezível, já não nos valem de nada os sistemas historiográficos criados para a análise dos grandes feitos científicos. A mudança no objeto a ser analisado inviabiliza os quadros teóricos clássicos da historiografia da ciência. Problemática nova, mas de certo modo já conhecida. Os enfoques em retóricas, subculturas, heterodoxias, filiações imaginárias, etc, têm imposto novos desafios à história

das ciências há algumas décadas. Se, por um lado, diversas já foram as incursões nesse pântano do cotidiano, por outro, há uma necessidade de sistematização de uma perspectiva historiográfica.

No capítulo 1, que serve de introdução aos demais, apresentaremos um breve panorama da história da historiografia acerca da interpretação da teoria quântica e delinearemos os problemas históricos (e historiográficos) desta tese de doutorado. Trata-se não somente de esmiuçar as práticas historiográficas levadas a cabo pelos historiadores da teoria quântica nas últimas décadas, mas também de problematizar a visibilidade das heterodoxias quânticas por eles descritas.

Uma heterodoxia científica que surge sem se propor inovadora não alardeia a sua própria dimensão heterodoxa. Por vezes, ela chega a alegar até mesmo uma adesão à ortodoxia vigente, ao mesmo tempo em que a subverte. Nesses casos, não podemos encontrar nas fontes a dimensão heterodoxa sendo alardeada. Essa dimensão precisa ser desvelada por meio da análise do historiador. Precisamos, portanto, discutir a visibilidade das heterodoxias quânticas. As duas questões que perpassam nossa reflexão são: o que vê o historiador da ciência? Como ele torna visível uma controvérsia científica? Essas questões, às quais retornaremos nas conclusões desta tese, são, no nosso entender, imprescindíveis para pensarmos a história das controvérsias dos quanta.

Capítulo 1

Introdução: sobre a visibilidade das heterodoxias quânticas

1.1 As interpretações da teoria quântica como objeto histórico

Os fenômenos naturais analisados pela teoria quântica impuseram aos físicos complexas situações experimentais nas quais os modos de pensar herdados da física do século XIX pareciam não ser mais de grande valia. Ideias fundamentais dessa física, tais como causalidade, determinismo, previsibilidade, entre outras, pareciam ter sido postas em xeque pelo modo como as novas evidências experimentais da física quântica eram interpretadas.

A necessidade de uma interpretação

A proposta de que a teoria quântica viesse a ser uma teoria acausal e indeterminista foi, aos poucos, ganhando espaço e, já no início da década de 1920, passou a ser amplamente aceita pelos físicos europeus.¹ A acausalidade e o indeterminismo da teoria eram incompatíveis com os esquemas interpretativos então existentes, herdados da física newtoniana e centrados na previsibilidade

¹Forman, Paul. **Weimar culture, causality, and quantum theory**: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment. HSPS, v. 3, pp. 1-115, 1971. O abandono da causalidade e do determinismo não foi, é claro, algo trivial, dado que as velhas concepções estão sempre arraigadas nas expectativas teóricas dos físicos de uma geração. Cf. Rossi, Paolo. **O nascimento da ciência moderna na Europa**. Bauru: EDUSC, 2001, pp. 29-30.

advinda do determinismo causal. Fazia-se necessário, portanto, elaborar uma nova interpretação para a física quântica, que deveria ser drasticamente diferente daquela da física anterior, então denominada física clássica.²

Ainda que os físicos, em sua maioria, concordassem sobre esse ponto, eles discordaram sistematicamente, durante grande parte do século XX, acerca de qual deveria ser a nova interpretação. Assim, diversas foram as propostas de uma interpretação da teoria quântica. A mais renomada delas foi feita pelo físico dinamarquês Niels Bohr em 1927.³ Buscando salvaguardar a objetividade da descrição física, Bohr elaborou o chamado “princípio da complementaridade”.

A interpretação de Copenhagen

Segundo esse princípio, a explicação de um determinado fenômeno físico depende das circunstâncias experimentais nas quais ele é observado. Diferentes circunstâncias evidenciam diferentes aspectos do fenômeno, os quais seriam mutuamente incompatíveis se existissem ao mesmo tempo, mas que entretanto são igualmente necessários para a descrição do fenômeno. Tais aspectos são ditos complementares. Deste modo, Bohr se afasta de uma concepção representacionista das teorias físicas, na medida em que os resultados a serem previstos passam a depender do contexto experimental. Esse papel ativo a ser desempenhado pela medida é algo novo na ciência. Com ele, o formalismo matemático deixa de ter a função de descrever o mundo.

Não vem ao caso precisar neste capítulo os pormenores desta interpretação, da qual falaremos em detalhes nos capítulos 2 e 3. O que nos interessa aqui é atentarmos, sob o ponto de vista histórico, ao fato desta interpretação da teoria quântica ter sido considerada, pela quase totalidade dos físicos, como sendo a última palavra na busca por uma interpretação da teoria quântica.

Esse consenso perdurou de 1927 a 1950, período no qual prosperou, nas palavras do historiador Max Jammer, a “quase incontestada monocracia da escola de Copenhagen na filosofia da

²Staley, Richard. **On the co-creation of classical and modern physics**. Isis, v. 96, n. 4, pp. 530-58, 2005.

³Bohr, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, v. 2, Bologna: Nicola Zanichelli, pp. 565-588, 1928. Bohr, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Nature (Supplement), v. 121, pp. 580-590, 1928. Ambos em NBCW7.

mecânica quântica”.⁴ Nas décadas de 1950 e 1960, surgiram as primeiras interpretações que se propunham uma alternativa à interpretação de Copenhague. Entretanto, essas propostas somente ganharam vigor a partir de 1970. A partir desse momento, muitas outras interpretações foram propostas e houve, por fim, o estabelecimento do dissenso.⁵

Uma periodização da história da física quântica

Assim, no que se refere ao consenso interpretativo na comunidade de físicos quânticos, temos três períodos bastante distintos, que poderíamos balizar da seguinte forma. O primeiro vai de 1927, ano da formulação da interpretação de Copenhague por Niels Bohr, até 1950. Esse período foi marcado pela opinião disseminada de que os principais problemas interpretativos da teoria quântica já haviam sido resolvidos em 1927.

O segundo período se estende de 1950 a 1970, no qual surgiram alguns oponentes à interpretação de Copenhague, notadamente David Bohm em 1951 e Hugh Everett em 1957. Esses foram casos razoavelmente isolados, que produziram poucos adeptos ou defensores.⁶

O terceiro período se estende de 1970 até hoje em dia, e se caracteriza pela ideia de que o problema da interpretação da física quântica está em aberto. Nesse período, muitos físicos defenderam interpretações alternativas àquela de Copenhague. As controvérsias interpretativas foram a regra, não casos isolados. Os anos em torno de 1970 são tomados aqui como os anos do estabelecimento do dissenso.⁷

⁴Jammer, Max. **The philosophy of quantum mechanics**: The interpretations of quantum mechanics in historical perspective. New York: John Wiley and Sons, 1974, p. 250.

⁵Uma lista de interpretações foi compilada em Beller, Mara. **Quantum Dialogues**: the making of a revolution. Chicago: University of Chicago Press, 1999, p. 106.

⁶Everett não produziu nenhum adepto, Bohm produziu alguns. Sobre Bohm, cf. Freire Jr, Olival. **Science and exile**: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of quantum mechanics. HSNS, v. 36, n. 1, 2000.

⁷Freire Jr, Olival. **Quantum dissidents**: Research on the foundations of quantum theory circa 1970. SHMP, v. 40, pp. 280–289, 2009.

Reações à monocracia de Copenhague

Como todo consenso que um dia se transforma em dissenso, a interpretação de Copenhague foi posteriormente chamada de autoritária. Não faltam exemplos de físicos, historiadores e filósofos que se dedicaram, nos últimos cinquenta anos, a acusar Bohr.

O filósofo Karl Popper disse que a “ortodoxia quântica” imposta por Copenhague apresentava todas as características dos partidos totalitários. O físico Georges Lochak, colaborador e biógrafo de Louis de Broglie, disse que Bohr era “o novo Belarmino”, em alusão ao cardeal da Igreja Católica que comandou a inquisição italiana na época de Galileu. Segundo Lochak, a aceitação da interpretação de Copenhague pela comunidade de físicos teria sido “um golpe de estado”. O historiador John Heilbron disse que a filosofia de Copenhague é “um misto de imperialismo e resignação”. O filósofo Mario Bunge disse que a interpretação de Copenhague era, na verdade, uma “doutrina”.⁸

Em oposição a tais acusações, muitos foram aqueles que defenderam Bohr. A historiadora e filósofa Catherine Chevalley disse que esses ataques visam uma “demonização de Bohr”. Ela o chama de “o São Sebastião da Nova Religião”, o qual, feito São Sebastião, teria sido crivado de fechas atiradas injustamente.⁹

O papel do historiador

Diante dessas adjetivações de Bohr, faz-se necessário um esforço historiográfico a fim de compreendermos o que era a interpretação de Copenhague, como ela era vista pelos seus defensores, como ela foi sendo alterada no decorrer do tempo, quais eram os seus mecanismos de manutenção e como a sua monocracia foi derrubada.

Uma parte considerável do esforço dos historiadores da física no século XX tem sido vol-

⁸Lochak, Georges . **Louis de Broglie**. Paris: Flammarion, 1992, em particular p. 138; Heilbron, John. **The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit**. *Revue d'Histoire des Sciences*, v. 38, n. 3-4, pp. 195-230, 1985, em particular p. 213. Bunge, Mario. **Strife About Complementarity**. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 6, n. 21, pp. 1-12, 1955, em particular p. 1. Cf. também Chevalley, Catherine. **La connaissance a-t-elle un sujet?** Un essai pour repenser l'individu. *Revue européenne des sciences sociales*, v. 40, n. 124, pp. 7-26, 2002, em particular p. 14.

⁹*Ibid.*

tada, portanto, à compreensão do surgimento das heterodoxias quânticas. Olival Freire elencou quais devem ser as preocupações dos historiadores interessados em estudar este objeto histórico. Segundo ele,

Vários são os fatores que podem ter desempenhado um papel na evolução da controvérsia sobre os fundamentos [da teoria quântica]. Entre esses fatores, devem ser considerados preconceitos profissionais, questões filosóficas e ideológicas, mudanças culturais e geracionais, e a diversidade de ambientes sociais e profissionais nos quais a Física foi praticada ao longo do século. Ao lado desses fatores, houve avanços teóricos e conceituais, inovações técnicas e sucessos em experimentos mentais e reais, bem como expectativas de aplicações tecnológicas. Contudo, nem todos esses fatores atuaram simultaneamente; de fato, em cada corte diacrônico dessa história apenas alguns desses fatores podem ser encontrados. O papel do historiador deve ser então o de discernir a influência de cada fator em cada contexto local e temporal.¹⁰

Nesta tese, nos inserimos nessa linha de pesquisa. Entretanto, o nosso enfoque é um pouco distinto daquele explicitado por Freire nessa citação. Para além de buscarmos entender como a questão das interpretações da teoria quântica se relaciona com diversos fatores sociais, políticos e culturais, buscamos aqui refletir sobre a visibilidade das rupturas. O que está em questão é a construção da visibilidade das heterodoxias quânticas. Assim, explicaremos agora qual é o ponto de vista que será estudado nesta tese.

1.2 O problema historiográfico em questão

Rupturas, heresias, novas interpretações

Algumas das interpretações da mecânica quântica surgiram por meio de ataques diretos à interpretação de Copenhague – como nos trabalhos de David Bohm, Jean-Pierre Vigié, John Bell, Klaus Tausk, Franco Selleri, Karl Popper, Heinz-Dieter Zeh, entre outros.¹¹

¹⁰Freire Jr, Olival. **Dissidentes quânticos**: pesquisa em fundamentos da teoria quântica em torno de 1970. In: Olival Freire Jr; Osvaldo Pessoa Jr; Joan Lisa Bromberg (ed). *Teoria Quântica: Estudos Históricos e Implicações Culturais*. Campina Grande: Editora UEPB e Livraria da Física, 2010, pp. 33-64, citação p. 33.

¹¹Cf. Freire Jr. **Quantum dissidents**, *op. cit.* Freire Jr, Olival. **Science and exile**: David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics. HSPS, v. 36, pp. 1-34, 2005. Freire Jr, Olival. **Popper, probabilidade e teoria**

Entretanto, as interpretações alternativas da teoria quântica nem sempre surgiram como rompimentos. Pelo contrário, algumas destas interpretações tiveram início como adesões à ortodoxia vigente. Buscando estender, complementar, clarificar certos aspectos da interpretação de Copenhague e, em geral, sem nenhum intuito de subvertê-la, muitos físicos usaram certos argumentos de Niels Bohr com propósitos que iam muito além de suas metas originais. Erosões teóricas inauditas assim ocorreram e novas perspectivas interpretativas emergiram silenciosamente.¹²

Ou seja, em certos momentos, novas interpretações surgiram como fruto de uma lenta erosão conceitual interna à interpretação de Copenhague.¹³ Nesses casos, o rompimento com a ortodoxia só pode ser estabelecido retrospectivamente, seja por contemporâneos, seja pela posteridade.¹⁴

Há na história da física quântica diversos momentos nos quais este segundo tipo de dinâmica histórica ocorreu. Por exemplo, no surgimento da chamada interpretação dos estados relativos da mecânica quântica, proposta por Hugh Everett, um jovem estudante de doutorado em Princeton, em 1957. John Wheeler, orientador de Everett e colaborador de Bohr, imaginava que a tese de seu aluno poderia clarificar a interpretação vigente, chegando a enviar Everett a Copenhague, a fim de obter o aval de Bohr. Entretanto, as suas ideias eram incompatíveis com as de Bohr, conforme foi frisado pelo mesmo e pelos demais físicos de Copenhague da época.¹⁵ Somente após esta visita a Copenhague que Everett tomou para si um lugar próprio de fala e a sua interpretação passou a ser considerada não uma extensão, mas sim uma alternativa à interpretação de Copenhague.

Outro caso similar ocorreu com Eugene Wigner em 1962. Tomando como ponto de partida os trabalhos de Bohr, mas também os de Werner Heisenberg e de John von Neumann, que compu-

quântica. *Episteme*, v. 18, pp. 103-127, 2004. Pessoa, Osvaldo; Freire Jr., Olival & de Greiff, Alexis. **The Tausk Controversy on the Foundations of Quantum Mechanics: Physics, Philosophy, and Politics.** *Physics in Perspective*, v. 10, n. 2, pp. 138-162, 2008.

¹²Sobre o termo “erosão”, cf. Hartog, François. **Évidence de l’histoire**: Ce que voient les historiens. Paris: Gallimard, 2005, p. 303. Cf. também Hacking, Ian. **From the Emergence of Probability to the Erosion of Determinism.** In: T. Hintikka, D. Gruender & E. Agazzi (eds). *Probabilistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science*, vol. 2. Dordrecht: D. Reidel, 1981, pp. 105-123, em particular p. 115.

¹³Freire denomina este movimento histórico “a clash inside orthodoxy”. Freire. **Quantum dissidents**, *op. cit.*, p. 284.

¹⁴Cf. Gumbrecht, Hans Ulrich. **Modernização dos sentidos.** Rio de Janeiro: Editora 34, 1998, p. 35. Cf. também Certeau, Michel de. **L’écriture de l’histoire.** Paris: Gallimard, 1975, p. 192.

¹⁵Osnaghi, Stefano *et alii*. **The origin of the Everettian heresy.** *SHMP*, v. 40, pp. 97-123, 2009.

nam, segundo ele, a “visão ortodoxa” da mecânica quântica, Wigner propôs uma interpretação mentalista do processo da medição.¹⁶ Ainda que acreditasse estar sendo fiel às ideias dos três físicos por ele mencionados, Wigner propôs algo inteiramente novo.

Um terceiro momento no qual esta dinâmica ocorreu foi nos trabalhos de Adriana Daneri, Angelo Loinger e Giovanni Maria Prosperi, publicados em 1962 e 1966. Eles tentaram explicar a medição quântica como sendo uma amplificação termodinâmica e acreditavam estar seguindo à risca as ideias de Bohr, que falecera em 1962. Mesmo tendo obtido a aprovação de Léon Rosenfeld, fiel escudeiro de Bohr, segundo o qual as ideias de Daneri, Loinger e Prosperi estavam “em completa harmonia com as ideias de Bohr”,¹⁷ hoje compreendemos que as ideias deles diferiam bastante do modo como Bohr abordou o problema da medição.¹⁸ Os trabalhos dos três físicos foram duramente criticados, em particular por Jeffrey Bub. Nesta controvérsia, curiosamente, ambos os lados argumentavam em defesa de Bohr. Segundo Freire, “pela primeira vez na história da mecânica quântica, uma cisão apareceu não entre os apoiadores da ortodoxia na interpretação dessa teoria e seus críticos, mas entre os apoiadores do que era então considerada a ortodoxia sobre o tema”.¹⁹

A visibilidade das heterodoxias

Se a heterodoxia que emerge de uma erosão somente pode ser plenamente compreendida retrospectivamente, estabelece-se assim uma distância fundamental entre a *historia rerum gestarum* e a *res gestae*. Enquanto rupturas explícitas – como as de Einstein e Bohm – são visíveis na *res*

¹⁶Freire Jr, Olival. **Orthodoxy and Heterodoxy in the Research on the Foundations of Quantum Physics: E.P. Wigner’s Case**. In: Boaventura de Sousa Santos (org). *Cognitive Justice in a Global World: Prudent Knowledges for a Decent Life*, vol. 1. Lanham: Lexington, 2007, pp. 203-224. Freire Jr, Olival. **The Historical Roots of “Foundations of Quantum Physics” as a Field of Research (1950–1970)**. *Foundations of Physics*, v. 34, pp. 1741-1760, 2004, em particular pp. 1746-1750.

¹⁷Rosenfeld, Léon. **The Measuring Process in Quantum Mechanics**. *Progress of Theoretical Physics Supplements*, volume extra, pp. 222-231, 1965, citação na p. 225. Neste sentido, é interessante o modo como Loinger apresenta a Rosenfeld a conclusão do seu trabalho com Daneri e Prosperi: “nós estamos orgulhosos de termos escrito, em certo sentido, uma espécie de ‘Bohr ab omni naevo vindicatus’”. **Carta Loinger para Rosenfeld**, 30.06.1965, RP 4-2-6.

¹⁸Osnaghi, Stefano. **A Dissolução Pragmático-Transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica**. *Cadernos de História e Filosofia das Ciências*, Série 3, v. 15, pp. 79-124, 2005, em particular p. 107.

¹⁹Freire. **Quantum dissidents**, *op. cit.*, p. 285. Cf. também Murdoch, Dugald. **Niels Bohr’s Philosophy of Physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989, pp. 114-118.

gestae, as erosões somente são visíveis na *historia rerum gestarum*. Ou seja, nos casos em que a heterodoxia surge inauditamente por meio de uma erosão teórica, a visibilidade das heterodoxias quânticas não é alardeada no ocorrido, não pode ser trivialmente apreendida nas fontes, mas deve ser construída no relato. O ofício do historiador não é, conforme Aristóteles o formulou, dizer o que de fato ocorreu;²⁰ não se reduz epistemologicamente a uma simples constatação;²¹ não espelha o ocorrido, significa-o.²²

Se a ruptura não existe no discurso dos físicos (seja por não existir de fato, seja por ser intencionalmente velada), os historiadores não podem se basear nas representações teóricas dos agentes históricos. Faz-se necessário, assim, operar no nível das práticas. Não está em questão o que os físicos dizem que fazem, nem as afiliações que eles crêem seguir e nem tampouco os nomes que eles dão aos seus objetos teóricos. É somente por meio de uma análise das práticas que nós podemos apreender as suas interpretações da teoria quântica.²³

Os problemas abordados nesta tese

Podemos agora, portanto, delinear os problemas históricos que serão abordados nesta tese.

Nosso primeiro intuito é apresentar uma história de como um artigo de Niels Bohr e Léon Rosenfeld, publicado em 1933, foi lido de 1933 a 1970. Nesse artigo, eles elaboraram um conceito em particular, a saber, a *medição de campos quânticos*. Segundo diversos historiadores, o artigo de 1933 teria sido muito pouco lido. No segundo capítulo, opondo-nos a essa opinião corrente, mostramos que aquele artigo foi lido por diversos físicos, entre os quais, John Wheeler, Bryce DeWitt, Eugene Wigner, Jacques Solomon e Vladimir Fock. Apresentamos também como esses

²⁰*Ta genomena legein*, em oposição à função do poeta, que é *ta genomena poiein* (criar o que pode ocorrer). Baxter, John & Atherton, Patrick (org). **Aristotle's Poetics**. Montreal: McGill-Queen's Univ. Press, 1997, pp. 70-80 (1451b4). Segundo Aristóteles, “não ocorre ao historiador *poiein ta genomena*, mas (somente) *legein ta genomena*, dizer o que aconteceu. Ele não ‘faz’, nem sequer ‘representa’. Os *genomena* estão aí, estão dados.” cf. Hartog, François. **A fábrica da história**: do “acontecimento” à escrita da história. História em Revista (Pelotas), v. 6, pp. 7-19, 2000, citação p. 16.

²¹Zangara. **Voir l'histoire**: Théories anciennes du récit historique. Paris: Vrin, 2007, p. 14 e p. 303.

²²Cf. Hartog, François. **Le miroir d'Hérodote**. Paris: Gallimard, 2001, p. 517.

²³Vale lembrar aqui a fala de Albert Einstein: a fim de entendermos os métodos dos cientistas, nós devemos “não ouvir as suas palavras, mas sim prestar atenção nas suas ações”. Einstein *apud* Dongen, Jeroen van. **Einstein's Unification**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, p. 9.

físicos utilizaram posteriormente a *medição de campos quânticos* em seus próprios textos de 1933 a 1970. Queremos compreender: como eles leram o artigo de 1933? Como essas leituras mudaram no decorrer do tempo? Há alguma relação entre o modo como o artigo foi lido e a emergência do pragmatismo na física no pós Segunda Guerra Mundial? Conforme mostramos neste capítulo, eles usaram as ideias de Bohr e Rosenfeld com propósitos que iam muito além das intenções originais desses dois físicos. Esta análise permite-nos repensar o significado do pragmatismo na física após a Segunda Guerra Mundial.

No terceiro capítulo, enfocaremos o caso de Bryce DeWitt, um dos mais ávidos leitores do artigo de 1933. Ele foi, a partir de 1967, um ferrenho defensor da interpretação de Everett da teoria quântica, a qual se opunha à interpretação de Copenhague. Queremos entender: Como DeWitt leu o artigo de 1933? Como se dá este jogo de leitura, admiração, extensão, apropriação, rompimento? Como e quando DeWitt passou a defender a interpretação de Everett? Por que ele o fez? Como este caso se insere em um panorama mais amplo acerca da autoridade de Copenhague? Vemos que os usos da medição de campos quânticos por ele empreendidos estão no cerne de sua adoção, a partir de 1967, da interpretação de Everett da teoria quântica. De uma tentativa de aproximação a Bohr surgiu uma adesão a Everett. A ruptura explícita com Copenhague é explicada retroativamente, olhando para o modo como ele, ao usar as ideias de Bohr acerca da medição de campos quânticos, se afastou silenciosamente da perspectiva bohriana.

Trata-se, aqui, não somente de apresentar novos estudos de caso de erosões conceituais, mas sobretudo de usar esses exemplos a fim de refletir acerca da construção da visibilidade das heterodoxias quânticas. Assim, os problemas históricos dos capítulos 2 e 3 servem de preâmbulo ao problema historiográfico que tratamos no capítulo 4, onde questionamos: o que faz o historiador quando torna visível uma heterodoxia?²⁴ Qual utensilagem teórica pode ser utilizada nessa análise retrospectiva do rompimento de uma ortodoxia?²⁵

²⁴Sobre a questão da visibilidade da história, cf. Zangara. *Voir l'histoire*, *op. cit.*, p. 13 e pp. 18-19.

²⁵Cf. Certeau. *L'écriture de l'histoire*, *op. cit.*, p. 193 e pp. 240-241.

Capítulo 2

Os muitos usos da medição de campos quânticos

Quem não louvará um Klopstock?
Entretanto, cada pessoa lerá toda a sua obra? – Não!
Nós queremos ser menos exaltados
e lidos com mais empenho.
Lessing (1753)¹

Introdução

As variantes interpretativas da teoria quântica, que na segunda metade do século XX puseram fim à monocracia de Copenhague, nem sempre surgiram como rompimentos. Pelo contrário, algumas dessas variações tiveram início como adesões à ortodoxia vigente. Buscando estender, complementar, ou clarificar certos aspectos da interpretação de Copenhague e, em geral, sem nenhum intuito de subvertê-la, muitos físicos usaram certos argumentos de Niels Bohr com propósitos que iam muito além de suas metas originais. Erosões teóricas inauditas assim ocorreram e novas perspectivas interpretativas emergiram silenciosamente. Neste capítulo, veremos como esta dinâmica histórica ocorreu, entre 1930 e 1970, com uma ideia em particular, denominada “medição de campos quânticos”, a qual foi elaborada por Bohr no início da década de 1930.

¹Lessing, Gotthold. **Lessings Werke**, Efter Teil. Berlin & Stuttgart: Verlag von W. Spemann, s/d, p. 123. “Wer wird nicht einen Klopstock loben?/ Doch wird ihn jeder lesen? – Nein!/ Wir wollen weniger erhoben/ und fleißiger gelesen sein.” Lessing se refere aqui ao poeta alemão Friedrich Klopstock, autor do renomado poema épico “Der Messias”.

2.1 O problema histórico em questão

Nesta seção, explicaremos o problema histórico deste capítulo. Começamos com um breve preâmbulo de física, a fim de explicar os conceitos sobre os quais falaremos ao longo deste capítulo.

O conceito de medição de campos quânticos

A teoria quântica impõe limitações à mensurabilidade simultânea de certas grandezas físicas. Por exemplo, é impossível se medir simultaneamente com absoluta precisão a posição e o momento linear de uma partícula. Tais quantidades podem ser medidas simultaneamente somente com uma precisão limitada. Esta limitação, tal qual os físicos a interpretam, não advém de erros técnicos experimentais, mas sim reflete uma característica fundamental intrínseca à natureza.

A impossibilidade de se medir simultaneamente a posição e o momento linear de uma partícula foi elucidada pelo físico Werner Heisenberg em 1927, por meio do experimento de pensamento denominado microscópio de raios γ .² Com esse experimento, ele mostrou que as incertezas associadas à medição destas grandezas – denotadas por Δx e Δp_x – satisfazem à desigualdade

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \frac{\hbar}{2}, \quad (2.1)$$

denominada princípio da incerteza de Heisenberg.³

²Cf. Heisenberg, Werner. **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik**. Zeitschrift für Physik, v. 43, n. 3-4, pp. 172-198, 1927, em particular p. 175 (tradução para o inglês **The physical content of quantum kinematics and mechanics**. In: J. A. Wheeler & W. H. Zurek. **Quantum Theory and Measurement**. Princeton: Princeton University Press, 1984, pp. 62-84.) Cf. também Heisenberg, Werner. **The Physical Principles of Quantum Theory**. Chicago: University of Chicago Press, 1930, pp. 21-25. Uma explicação bastante clara do microscópio de raios γ pode ser encontrada em: Pessoa Jr, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**, v. 1. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003, pp. 77-78; Jammer, Max. **The philosophy of quantum mechanics: The interpretations of quantum mechanics in historical perspective**. New York: John Wiley and Sons, 1974, pp. 63-68.

Um *experimento de pensamento* (do alemão *gedankenexperiment*) é uma situação experimental hipotética, na qual as únicas limitações impostas à sua realização são as próprias limitações intrínsecas às grandezas físicas usadas na medição. Ou seja, a montagem experimental é pensada de modo teórico, sem se levar em conta as limitações advindas dos problemas técnicos existentes nas montagens experimentais reais. No caso particular da mecânica quântica, os experimentos de pensamento são usados para analisar as limitações existentes na medição das grandezas físicas, tais como velocidade e posição. A limitação de uma grandeza X sobrevem das limitações existentes nas definições das grandezas Y, Z, W, etc utilizadas na situação experimental criada para se medir X.

³Heisenberg. **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik**, *op. cit.*. Nesse primeiro trabalho, Heisenberg propôs a ideia do do microscópio de raios γ , entretanto somente em 1929 ele apresentou uma análise quantitativa desse experimento de pensamento, a qual foi publicada em seu livro de 1930.

Esta impossibilidade de medição deve se refletir no formalismo matemático como uma impossibilidade de definição simultânea das mesmas grandezas. Isso é garantido, na teoria quântica, pela existência de uma não-comutatividade dos operadores posição e momento linear,

$$[\hat{x}, \hat{p}_x] = i \hbar \mathbb{1} , \quad (2.2)$$

onde \hat{x} e \hat{p}_x são, respectivamente, os operadores posição e momento linear, e $\mathbb{1}$ é o operador identidade. A partir desta não-comutatividade, pode-se deduzir as mesmas relações de incerteza (2.1). Ou seja, as possibilidades de definição deduzidas a partir do formalismo matemático da teoria estão em conformidade com as possibilidades de medição analisadas por meio do microscópio de raio γ . Caso a teoria, em seu formalismo matemático, não impusesse tais limitações às definições destas duas grandezas, poderíamos falar, por exemplo, em trajetória de uma partícula na mecânica quântica, criando assim uma disparidade entre as previsões da teoria e as possibilidades de se testar tais previsões. Ou seja, é necessário haver uma harmonia entre definibilidade e mensurabilidade.⁴

Em 1929, dois anos depois que propôs o microscópio de raios γ , Heisenberg desenvolveu com Wolfgang Pauli um formalismo matemático para a teoria quântica do campo eletromagnético. Há, nesta teoria, diversos comutadores entre os operadores de campo e Heisenberg se perguntou, então, se as limitações na definição do campo eletromagnético provenientes desses comutadores estariam em conformidade com as limitações na mensurabilidade do mesmo. A fim de efetuar tal comparação, fazia-se necessário, pois, construir um experimento de pensamento no qual fosse realizada uma medição do campo eletromagnético.

Heisenberg esboçou o problema e escreveu uma carta relatando suas ideias a Niels Bohr, um antigo interlocutor seu em assuntos epistemológicos da teoria quântica. Em 1927, na mesma época em que Heisenberg formulara as suas relações de incerteza, Bohr elaborara o princípio da Complementaridade, elemento central da dita *interpretação de Copenhague da teoria quântica*. Ainda que

⁴Cf. Kalckar, Jørgen. **Measurability problems in the quantum theory of fields**. In: B. d’Espagnat (ed). *Fondamenti di meccanica quantistica: Rendiconti della scuola internazionale di fisica Enrico Fermi*. New York: Academic Press, 1971, pp. 127-169, em particular p. 127.

certas propriedades canonicamente conjugadas (tais como posição e momento linear) não possam ser observadas ao mesmo tempo, ambas são, segundo Bohr, necessárias para a descrição completa dos fenômenos físicos. Ele diz, então, que tais grandezas são *complementares*. As análises das relações entre definibilidade e mensurabilidade tinham, nesse contexto, a função de explorar o modo como os conceitos físicos, tais como posição e momento, eram utilizados. A concordância entre definibilidade e mensurabilidade foi por ele denominada *consistência*.⁵

As ideias de Heisenberg, conforme mostraremos na seção 2.2, foram recebidas entusiasticamente em Copenhague, não somente por Bohr, mas também pelos físicos Lev Landau e Rudolf Peierls. Eles escreveram um artigo mostrando que não há acordo entre definibilidade e mensurabilidade na teoria quântica do campo eletromagnético, ou seja, que a teoria não é consistente.⁶ Os autores concluíam, então, que a física quântica não poderia ser estendida ao domínio relativístico, não sendo possível, portanto, formular uma teoria quântica para o eletromagnetismo. Esse artigo causou um grande rebuliço na época e exigiu uma resposta de Bohr. Em colaboração com Léon Rosenfeld, ele escreveu um longo artigo mostrando que Landau e Peierls estavam errados.⁷ Essa disputa foi jocosamente denominada, por Oskar Klein, “a pequena guerra de Copenhague”.

Bohr e Rosenfeld, nesse artigo, explicaram em detalhes como construir um experimento de pensamento para se medir o campo eletromagnético quântico e demonstraram que as incertezas deduzidas a partir desse experimento de pensamento estão sim em conformidade com os comutadores da eletrodinâmica quântica de Pauli-Heisenberg. A teoria quântica do campo eletromagnético é, portanto, uma teoria consistente. Esse é o resultado final do artigo de 1933.

⁵Sobre o conceito de “consistência” em Bohr, cf. Bohr, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, v. 2, Bologna: Nicola Zanichelli, pp. 565-588, 1928, em particular p. 578 (BCW6: 113-146); Bohr, Niels. **The Atomic Theory and the Fundamental Principles underlying the Description of Nature**. In: N. Bohr, Atomic Theory and the Description of Nature, Cambridge University Press, 1934, pp. 102-119. (BCW6: 236-253). Vale observar, alguns autores preferem utilizar o termo “coerência”, que é tomado como um sinônimo de consistência, e.g., Darrigol, Olivier. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique: l'exemple de «Bohr-Rosenfeld»**. Revue d'histoire des sciences, v. 44, n. 2, pp. 137-179, 1991, pp. 177-178.

⁶Landau, Lev & Peierls, Rudolf. **Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie**. Zeitschrift für Physik, v. 69, n. 1-2, pp 56-69, 1931, citação na p. 69. Há uma tradução, com alguns graves erros, em Ter-Haar, Dirk. **Collected papers of L. D. Landau**. New York: Gordon and Breach, 1965, pp. 40-51.

⁷Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen**. Mat.-Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk., bd. 12, n. 8, pp. 1-65, 1933.

Quem leu o artigo de 1933?

Considerado o vencedor da acirrada disputa com Landau e Peierls, o artigo de Bohr e Rosenfeld foi considerado um clássico. Um amigo de Bohr certa vez teria dito: “Este é um artigo muito bom que não é necessário se ler. Só é necessário saber que ele existe”. Ou seja, bastaria saber que Bohr demonstrou que a eletrodinâmica quântica é uma teoria consistente. Os detalhes da demonstração, demasiadamente sofisticada, não seriam relevantes. Segundo Abraham Pais, o artigo de 1933, apesar de ser um clássico, teria sido lido por muito poucas pessoas.⁸

O historiador Olivier Darrigol, em uma excelente análise do trabalho de Bohr e Rosenfeld, também afirmou que “muitos físicos parabenizaram Bohr e agradeceram-no pelos exemplares [do artigo] generosamente distribuídos (...), mas poucos levaram a cabo uma leitura atenta, uma vez que o que estava em jogo [no trabalho] não era evidente para aqueles que não tinham participado da elaboração da complementaridade”. Darrigol ressaltou, então, os casos de Heisenberg e Pauli, que “sempre estiveram interessados nas questões epistemológicas, e apreciaram plenamente a importância e a beleza do trabalho de Bohr-Rosenfeld”.⁹ Por fim, avaliando o impacto do artigo no estabelecimento de novos resultados na teoria quântica de campos, ele concluiu que “o artigo de Bohr-Rosenfeld não se apresentou como um guia útil na pesquisa de novas teorias”.¹⁰

O fato do artigo ter sido muito elogiado e, ao mesmo tempo, largamente ignorado também foi expressado pelo próprio Rosenfeld. Em uma entrevista em 1963, ele disse:

Acho que ocorre com [o artigo de 1933] o mesmo que ocorreu com o [poema] “O Messias” [do escritor alemão] Klopstock. Há este famoso epigrama de Lessing (...) sobre esse poema: todos concordam que é uma obra prima, mas quantos o leram? E Lessing conclui: [nós queremos ser menos elogiados e lidos com mais empenho].¹¹

⁸Pais, Abraham. **Niels Bohr Times**: in Physics, Philosophy, and Polity. Oxford: Oxford University Press, 1991, citação p. 362.

⁹O diálogo entre Bohr, Pauli e Heisenberg sobre a medição de campos quânticos foi recentemente analisado à exaustão por Jacobsen, Anja Skaar. **Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics**: The failed appropriation of epistemology in the second quantum generation. In: C. Carson *et alii* (ed). Weimar culture and quantum mechanics, London: Imperial College Press, 2011, pp 375-396.

¹⁰Darrigol. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique**, *op. cit.*, citações pp. 177-178. Darrigol ressalva uma vez mais o caso de Heisenberg, que tentou estender as ideias de Bohr em 1935, e observa também a existência de uma correspondência entre Max Born e Bohr sobre o tema em 1945.

¹¹Léon Rosenfeld em entrevista a Thomas Kuhn e John Heilbron, 19.07.1963, OH. Rosenfeld menciona aqui o

Os historiadores Anja Jacobsen e David Kaiser buscaram explicar o porquê desse artigo não ter sido amplamente lido pelos demais físicos. Eles defendem que isto ocorreu não somente porque os seus argumentos eram difíceis de serem compreendidos, mas também porque a relevância da sua argumentação teria sido perdida durante as décadas de 1940 e 1950. Nesse período, a física teórica se afastou de argumentos de caráter epistemológico, tais como aqueles apresentados por Bohr e Rosenfeld, e se deslocou para uma abordagem mais pragmática, utilitária e instrumentalista.¹² Nesta nova abordagem, não havia espaço para o tipo de argumento de cunho epistemológico apresentado pelo artigo de 1933. Os jovens físicos estavam muito preocupados com cálculos e verificações experimentais, de tal modo que “ou tinham dificuldade em compreender as sutilezas das reflexões críticas da geração mais velha, ou eram por demasiado impacientes para se preocuparem com elas”.¹³

Assim, a perda de importância do artigo de 1933 teria sido consequência de uma mudança maior, uma mudança no modo como a física se articulava e quais tipos de argumentos eram então considerados relevantes. O historiador David Kaiser, em uma afirmação espirituosa, disse que Bohr e Rosenfeld venceram a “pequena guerra” de Copenhagen contra Landau e Peierls em defesa da teoria quântica de campos, porém perderam a “grande guerra” do século XX acerca de como a física deveria ser feita.¹⁴ Por fim, venceu o pragmatismo, o utilitarismo, o instrumentalismo. Nesta

epigrama de Lessing que figura na epígrafe deste capítulo. Como esta foi uma citação feita de cabeça, ele acaba por refrasear as palavras de Lessing, dizendo “wir wollen minder gepriesen und fleißiger gelesen sein”.

Vale observar que Rosenfeld, como lhe é costumeiro, remonta, com esse comentário, uma longa tradição literária, provavelmente de modo intencional. Esse epigrama de Lessing foi escrito em resposta a um outro epigrama, de autoria do escritor hispânico antigo Marcus Valerius Martialis, a saber: “A nostris procul est omnis uestigia libellis./ Musa nec insano symmate nostra tumet./ Illa tamen laudant omnes, mirantur, adorant’./ Confiteor: laudant illa, sed ista legunt” que, em uma tradução livre, diz: “Longe dos meus [epigramas] está toda turgidez e neles tampouco a Musa se incha com as vestimentas loucas da tragédia [tal qual acontece com outros autores]. ‘Entretanto, aquelas tragédias são louvadas, admiradas e adoradas por todos’ [pondera Flacus]. Confesso: esse estilo [trágico dos demais] é louvado, eu sou lido”. Martialis, Marcus Valerius. **Martial Epigrams**, v. 1. London: William Heinemann, 1919 (original 86-103 d.C.), pp. 264-265 (livro IV, ep. 49). A tradução foi feita cotejadamente à tradução inglesa apresentada nesse volume bilíngue. Sobre a erudição de Rosenfeld, cf. Jacobsen, Anja Skaar. **Leon Rosenfeld: Physics, Philosophy, and Politics in the Twentieth Century**. Singapore: World Scientific, 2012, ver toda a obra, em particular p. 2 e suas referências.

¹²Sobre esta transição, cf. Schweber, Sam. **The empiricist temper regnant: Theoretical physics in the United States, 1920- 1950**. HSPS, v. 17, n. 1, pp. 55-98, 1986.

¹³Jacobsen. **Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics**, *op. cit.*, citação na p. 394.

¹⁴Kaiser, David. **Comments on “Interpreting quantum mechanics: a century of debate”**. HSS Session, Washington, Novembro de 2007, não publicado, em particular p. 4. Cf. também Jacobsen. **Crisis, measurement problems, and**

explicação histórica, o destino do artigo de Bohr e Rosenfeld era ser esquecido como uma peça de física antiquada.

Uma história dos usos

Questionamos aqui esta explicação do declínio da relevância do artigo de Bohr e Rosenfeld por meio de uma análise de como esse artigo foi lido e usado durante o período de 1933 a 1970.

Contrariamente ao que é propalado na literatura de história das ciências, mostraremos que o artigo foi amplamente lido e usado durante esse período, e muitos físicos – John Wheeler, Bryce DeWitt, Eugene Wigner, Hugh Everett, Jacques Solomon, Vladimir Fock, entre outros – foram influenciados por esta argumentação. Alguns deles chegaram a formular pesquisas sólidas baseadas diretamente nas ideias de Bohr. Pela expressão “ideias de Bohr” entendemos o modo como os argumentos criados por Bohr são engendrados em um discurso. Ou seja, não dizemos “ideia” de modo abstrato, mas sim de modo contextual em uma argumentação específica. Trata-se de analisar aqui como os argumentos do artigo de 1933 foram reutilizados por outros físicos.

Os nossos objetivos neste capítulo são, primeiro, chamar a atenção dos historiadores da física a esses trabalhos, os quais até agora foram consideravelmente ignorados;¹⁵ segundo, compreender

controversy in early quantum electrodynamics, *op. cit.*, p. 395. O nome “pequena guerra” foi cunhado, de modo jocoso, por Oscar Klein, cf. *ibid.*, p. 384.

¹⁵ Até onde sabemos, a maioria das fontes primárias que analisaremos na seção 2.3 serão analisadas aqui pela primeira vez. Devemos, pois, dizer quais são as exceções. Os artigos de Bronstein e o artigo de Solomon de 1938 foram mencionados por: Stachel, John. **History of Relativity**. In: A. Pais *et alii*. *Twentieth Century Physics*. New York: IOP Publishing, 1995, pp. 249-356, em particular nas pp. 317-319; Stachel, John. **Quantum Field Theory and Space-Time: Introduction**. In: T. Yu Cao (ed). *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, pp. 166-175; Stachel, John. **The early history of quantum gravity**. In: B. R. Iyer & B. Bhawai (ed). *Black Holes, Gravitational radiation and the Universe*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1998, pp. 524-534, em particular pp. 528-532; Gorelik, Gennady. **First Steps of Quantum Gravity and the Planck Values**. In: J. Eisenstaedt & A. J. Kox (ed). *Studies in the History of General Relativity (Einstein Studies, v. 3)*. Boston: Birkhaeuser, 1992, pp. 364-379; Gorelik, Gennady. **Matvei Bronstein and quantum gravity: 70th anniversary of the unsolved problem**. *Physics-Uspekhi*, v. 48, n. 10, pp. 1039-1053, 2005; Gorelik, Gennady & Frenkel, Victor. **Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties**. Zurich: Birkhauser, 1994, em particular pp. 99-112; Rickles, Dean. **Quantum Gravity meets &HPS**. In: S. Mauskopf & T. Schmaltz. *Integrating History and Philosophy of Science: Problems and Prospects*. Dordrecht: Springer, 2010, pp. 163-199, em particular p. 181. O livro de Henley e Thirring e o curso de DeWitt em Les Houches em 1963 são mencionados por Kalckar. **Measurability problems in the quantum theory of fields**, *op. cit.*, p. 127 e p. 153; Darrigol. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique**, *op. cit.*, p. 179. Dentre esses textos, os únicos que analisam detalhadamente o modo como as ideias de Bohr acerca da medição de campos quânticos foram utilizadas por outros físicos são os trabalhos de Gorelik sobre Matvei Bronstein.

como e com quais objetivos esses físicos fizeram tais usos. Conforme mostraremos, eles usaram as ideias de Bohr com propósitos que iam muito além das suas intenções originais, de maneiras por vezes bastante pragmáticas e instrumentalistas. A história dos rumos das ideias de Bohr não deve atentar somente a quem as leu, mas também a como elas foram lidas. Esses usos diferentes não foram realizados com o propósito de estabelecer novas interpretações. Os físicos sobre os quais falaremos não buscavam subverter a interpretação vigente, mas ainda assim as suas ideias abriram espaço para novas interpretações. Na prática cotidiana da física, o conceito de medição de campos quânticos silenciosamente deslizou rumo a novos significados. Estamos interessados em analisar esse movimento histórico, a fim de ver a derrocada de velhas ideias e a sua reutilização inaudita com novos propósitos.

Esses ecos das ideias de Bohr passaram bastante despercebidos na literatura de história da ciência. Ao chamar atenção para esses trabalhos, estamos interessados em dar um passo adiante em uma apreciação mais precisa da influência de Niels Bohr na física do século XX e, em particular, na teoria quântica de campos.¹⁶ Ainda que tenham sido, por vezes, contrários às suas intenções originais, esses desenvolvimentos mostram não somente a importância de Bohr, que foi uma referência central para muitos físicos que analisaremos, mas também a fertilidade de suas ideias, que foram usadas de muitos modos e em diferentes contextos.

Organização deste capítulo

Este capítulo se divide em três partes. Na seção 2.2, explicaremos as ideias de Bohr e de seus interlocutores entre 1930 e 1933. Esse debate de 1930-1933 já é bastante conhecido. Na seção seguinte, a principal deste capítulo, analisaremos como outros físicos usaram estas ideias de 1933 a 1970. Por fim, apresentaremos as conclusões.

¹⁶É necessário reconhecer (conforme mostramos no capítulo 1) que a historiografia da física quântica foi marcada, por muitas décadas, por um sectarismo acerca de Bohr. Esta divisão da comunidade de historiadores entre apoiadores e críticos ferrenhos de Bohr deixou suas marcas na escrita da história. Compartilhamos da opinião de historiadores como Olival Freire Jr, Alexei Kojevnikov, David Kaiser, entre outros, segundo os quais é necessário repensar essa historiografia. Fazemos isto sob influência de dois textos. Ricoeur, Paul. **A memória, a história, o esquecimento**. Campinas: Editora da Unicamp, 2007, em particular pp. 330-356; Rancière, Jacques. **Les noms de l'histoire: Essai de poétique du savoir**. Paris: Seuil, 1992.

2.2 A medição dos campos quânticos segundo Bohr e Rosenfeld

Nesta seção, detalharemos os argumentos de Heisenberg, Landau, Peierls, Bohr e Rosenfeld acerca da medição de campos quânticos. O nosso objetivo é deixar as ideias desses físicos (sobretudo as de Bohr) suficientemente claras para que possamos compreender, na próxima seção, o modo como elas foram usadas e alteradas por outros físicos.

Não temos o intuito de narrar pela primeira vez esta história, posto que tais argumentos já foram amplamente analisados na literatura de história das ciências.¹⁷

¹⁷Em 1970, Jørgen Kalckar publicou uma detalhada exposição conceitual desses trabalhos, que até hoje não foi superada em profundidade e detalhamento. Kalckar. **Measurability problems in the quantum theory of fields**, *op. cit.* No início dos anos 1990, surgiram os dois primeiros artigos históricos sobre o tema, um de autoria de Olivier Darrigol e o outro de Arthur Miller. Darrigol. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique**, *op. cit.*; Miller, Arthur. **Measurement Problems in Quantum Field Theory in the 1930's**. In: A. I. Miller. *Sixty-Two Years of Uncertainty: Historical, Philosophical, and Physical Inquiries into the Foundations of Quantum Mechanics*. New York: Plenum Press, 1990, pp. 139-152. Esses artigos enfocaram os argumentos em questão, mas não discutiram a gênese do artigo de 1933. Em 1994, Sam Schweber afirmou que “a história detalhada de como esse importante trabalho [de Bohr e Rosenfeld] veio a ser escrito ainda não foi contada”. Schweber, Sam. **QED and the men who made it**: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga. Princeton: Princeton University Press, 1994, p.111. Em 1996, na introdução do volume 7 das obras coligidas de Bohr, Jørgen Kalckar apresentou uma cuidadosa compilação de fontes sobre o artigo de 1933. Kalckar, Jørgen. **Introduction**. In: NBCW7, pp. 3-51. Recentemente, Anja Jacobsen publicou uma análise minuciosa do diálogo Bohr-Pauli durante o período em que Bohr estava escrevendo o artigo de 1933 com Rosenfeld. Jacobsen. **Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics**, *op. cit.* Peter Bokulich, em sua tese de doutorado, também analisou muito precisamente o modo como o artigo de 1933 se relaciona com o pensamento de Bohr. Bokulich, Peter. **Horizons of Description: Black Holes and Complementarity**, PhD thesis, Graduate Program in Philosophy, Notre Dame University, Indiana, Estados Unidos, Abril 2003.

Os trabalhos de Heisenberg, Landau, Peierls, Bohr e Rosenfeld são mencionados também, ainda que brevemente, em importantes livros de história da física do século XX. A saber, Jammer. **The philosophy of quantum mechanics**, *op. cit.*, 1974, pp. 142-145; Pais. **Niels Bohr Times**, *op. cit.*, pp. 359-364; Schweber. **QED and the men who made it**, *op. cit.*, pp. 111-112; Kragh, Helge: **Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century**, Princeton: Princeton University Press, 1999, p. 198; Kojevnikov, Alexei. **Stalin's Great Science: The Times and Adventures of Soviet Physicists**. London: Imperial College Press, 2004, pp. 87-88.

Ainda que compreendamos atualmente muito bem as opiniões de Bohr, falta estudarmos cuidadosamente o caso de Landau & Peierls. Karl Hall, um especialista em Landau, afirmou em 2008: “Ainda que tenha plantado as sementes de muitas futuras anedotas sobre [Landau] na comunidade de física, esta disputa [com Bohr] não iniciou a ruptura conceitual que Landau buscava. Pelo contrário, ajudou a colocar a medição em um nível ainda mais fundamental no formalismo já existente. Não é nosso propósito aqui apresentar de maneira detalhada o ‘triunfo’ da visão de Bohr acerca da medição de campos, portanto daremos pouca atenção aqui ao trabalho de Bohr-Rosenfeld. Ainda que houvesse profundas diferenças temperamentais entre Bohr e Landau em suas abordagens à física, diferenças cujas consequências para a prática da física teórica são amplamente obscurecidas nas explicações padrões de como Bohr e Rosenfeld descartaram as críticas de Landau e Peierls”. Hall, Karl. **The Schooling of Lev Landau: The European Context of Postrevolutionary Soviet Theoretical Physics**. *Osiris*, v. 23, n. 1, 2008, pp. 230-259, citação p. 251. Não temos nenhum intuito de contribuir para esse problema posto por Hall, que continua em aberto.

A medição de campos segundo Heisenberg

A história da medição dos campos quânticos começa com Werner Heisenberg.

Em seu famoso artigo no qual propôs as relações de incerteza entre posição e momento linear, publicado em 1927, ele adotara uma postura filosófica explicitamente operacionalista. Uma vez que as relações de incerteza que estava propondo relacionavam as medições de posição e de momento linear do elétron, fazia-se necessário dizer o que significavam tais quantidades. Segundo ele,

Quando se quer ser claro acerca do que se entende pelas palavras “posição de uma partícula”, por exemplo um elétron (...), faz-se necessário especificar experimentos definidos com a ajuda dos quais se pode medir a “posição do elétron”; caso contrário, estas palavras não têm nenhum significado.¹⁸

Fazendo jus a esse operacionalismo, Heisenberg esboçou um experimento de pensamento com o qual se pode medir a posição de um elétron. Esta ideia foi explorada por ele com muito mais detalhes, e de modo quantitativo, em um curso ministrado na Universidade de Chicago em 1929 e publicado em formato de livro em 1930.¹⁹ A situação experimental apresentada pode ser resumida da seguinte maneira e ilustrada na figura 2.1.²⁰ Um elétron (localizado na ponta inferior na figura) é iluminado por um fóton enviado horizontalmente (seta x); o fóton é espalhado verticalmente pelo elétron e observado por meio de um aparato ótico, similar a um microscópio.

Para garantir uma boa precisão na medição da posição do elétron, devemos iluminá-lo com um fóton de pequeno comprimento de onda, ou seja, de grande frequência. Entretanto, devido a esta grande frequência, o fóton tem um grande momento linear, o que, conforme Heisenberg mostrou, produz uma grande perturbação, de caráter incontrolável, no momento linear do elétron. Assim, a medição da posição do elétron nos impede de conhecer o seu momento linear de tal modo que as

¹⁸Heisenberg. *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. *op. cit.*, p. 174. Sobre o operacionalismo de Heisenberg, cf. Heisenberg, Werner. *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York: Harper & Row, 1971, em particular pp. 58-69.

¹⁹Heisenberg. *The Physical Principles of Quantum Theory*, *op. cit.*, pp. 20-25.

²⁰Ilustração em *ibid.*, p. 21.

incertezas em ambas as grandezas satisfazem a desigualdade

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \frac{\hbar}{2}. \quad (2.3)$$

Uma vez que o fóton utilizado é de alta frequência, esse experimento de pensamento foi denominado “microscópio de raios γ ”.²¹

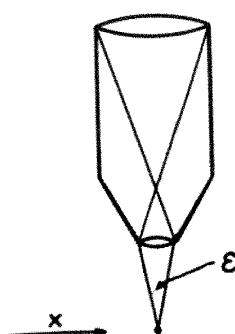


Figura 2.1: Ilustração original do microscópio de raios γ por Heisenberg publicada em 1930.

Para Heisenberg, esse experimento de pensamento fornecia “uma explicação direta e intuitiva da relação [de comutação] $\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = i\hbar$ ”.²² Os experimentos de pensamento tinham, na perspectiva filosófica de Heisenberg, a função de, expondo as definições operacionais, tornar a teoria quântica inteligível.²³ Vem daí a centralidade dos experimentos de pensamento em seus

²¹Para maiores detalhes, cf. Jammer. *The philosophy of quantum mechanics*, op. cit., 1974, pp. 63-68. Heisenberg, em conformidade com a sua postura operacionalista, deixa em aberto, nesse curso de 1929, a questão de as incertezas serem de aspecto epistemológico (ou seja, relativas a uma impossibilidade no conhecimento das propriedades do elétron) ou ontológico (relativas a estas próprias propriedades). A escolha de uma destas duas posturas, uma vez que não pode ser definida por meio de um experimento, é uma “questão de crença pessoal”. Heisenberg. *The Physical Principles of Quantum Theory*, op. cit., pp. 20. Como observa Scott Tanoma, a postura operacionalista (ou positivista) de Heisenberg colapsa a distinção entre incertezas epistemológica e ontológica. Cf. Tanoma, Scott. *Uncertainty in Bohr’s response to the Heisenberg microscope*. SHMP, v. 35, n. 3, pp. 483–507, 2004, em particular p. 484.

²²No original, “eine direkte anschauliche Erläuterung der Relation $\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = i\hbar$ ”. Heisenberg. *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. op. cit., p. 175. Os experimentos de pensamento tinham, portanto, a função de *erläutern* (elucidar, explicar, iluminar) o formalismo matemático. Eckart e F. C. Hoyt, que traduziram para inglês o curso de 1929, utilizaram o verbo “to illustrate”, que não é uma boa tradução. Cf. Heisenberg. *The Physical Principles of Quantum Theory*, op. cit., pp. 20. A mesma palavra foi usada por Beller, Mara. *Quantum Dialogues: the making of a revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1999, p. 109.

²³O adjetivo usado em alemão é “anschaulich”, que pode ser traduzido como “inteligível” ou “visualizável”. Para uma análise, cf. Hilgevoord, Jan & Uffink, Jos. *The Uncertainty Principle*. Stanford Encyclopedia of Philosophy, online em plato.stanford.edu, 2006, em particular a seção 2.1 (consultado em 15.07.2013).

trabalhos.²⁴ Ele disse:

Nós acreditamos que compreendemos intuitivamente (*anschaulich zu verstehen*) uma teoria física quando nós podemos pensar qualitativamente sobre as consequências experimentais em todas as situações [experimentais] simples.²⁵

A inteligibilidade não estava, para Heisenberg, relacionada à questão da interpretação da teoria quântica. Tornar o formalismo “intuitivo” não era sinônimo de interpretá-lo. Para ele, a interpretação estava dada, sendo uma consequência do formalismo. Não se fazia necessário um esforço interpretativo.²⁶ Foi com esta concepção de experimento de pensamento que Heisenberg abordou, em seu curso de 1929, um problema muito mais complicado: a medição do campo eletromagnético.

No mesmo ano, em colaboração com Wolfgang Pauli, ele escrevera um artigo sugerindo um conjunto de comutadores para a teoria quântica do campo eletromagnético.²⁷ Esses comutadores estabeleciam novas relações de incerteza, desta vez para as componentes do campo eletromagnético.²⁸ Fazia-se necessário, então, construir um experimento de pensamento no qual o campo eletromagnético fosse medido, a fim de explicar as impossibilidades de medição simultânea das amplitudes de campos elétrico e magnético. O objetivo era tornar a complexa teoria quântica do campo eletromagnético intuitiva.

Partindo da premissa que a medição de um campo eletromagnético deve ser realizada por meio de uma análise da sua ação sobre um objeto eletricamente carregado, Heisenberg analisou teoricamente a deflexão de um feixe de elétrons ao passarem por uma região onde há um campo

²⁴Beller. *Quantum Dialogues*, *op. cit.*, pp. 90-91.

²⁵Heisenberg. *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. *op. cit.*, p. 172.

²⁶Beller. *Quantum Dialogues*, *op. cit.*, pp. 108-110. Tanoma. *Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope*, *op. cit.*, pp. 486.

²⁷Heisenberg, Werner & Pauli, Wolfgang. *Zur Quantendynamik der Wellenfelder I*. *Zeitschrift für Physik*, v. 56, n. 1-2, pp. 1-61, 1929. Esse artigo apresentou uma demonstração muito complicada, o que exigiu uma segunda demonstração, mais elementar, que foi publicada em: Heisenberg, Werner & Pauli, Wolfgang. *Zur Quantendynamik der Wellenfelder II*. *Zeitschrift für Physik*, v. 59, n. 3-4, pp. 168-190, 1931. Para uma análise histórica, cf. Darrigol, Olivier. *La genèse du concept de champ quantique*. *Annales de Physique*, v. 9, n. 3, pp. 433-501, 1984. Nesses artigos de Heisenberg-Pauli foi desenvolvido o método de fixação de calibre por meio da adição de um termo à lagrangiana.

²⁸Sobre a relação entre incerteza e comutadores, cf. Beller. *Quantum Dialogues*, *op. cit.*, pp. 86-87.

eletromagnético. A partir da existência de uma difração das ondas de matéria associadas ao feixe de elétrons, ele derivou incertezas para as componentes do campo eletromagnético, obtendo que as componentes x do campo elétrico (E) e z do campo magnético (H) estão sujeitas às incertezas²⁹

$$\Delta E_x \Delta H_z \gtrsim \frac{hc}{(\delta l)^4}, \quad (2.4)$$

onde δl é o comprimento da região na qual o feixe está sob a ação do campo eletromagnético. Vale observar, a relação (2.4) está errada, conforme veio a ser mostrado por Bohr e Rosenfeld.³⁰

Na medição do campo eletromagnético feita por Heisenberg, as incertezas do sistema (campo) advêm dos aspectos quânticos do aparato (feixe) e não de algo intrínseco ao sistema a ser medido (campo) ou à interação entre o sistema (campo) e o aparato (feixe). Ou seja, segundo Heisenberg, o aspecto quântico migra do aparato para o sistema. Conforme veremos, Bohr e Rosenfeld criticaram tacitamente essa ideia. Boa parte das discussões realizadas durante o século XX sobre a medição de campos foi (conscientemente ou não) fruto de discordâncias recorrentes acerca desse ponto.

Com esse esboço de Heisenberg, surgiu a ideia de se medir campos na física quântica.

A medição na mecânica quântica segundo Bohr

A argumentação de Heisenberg era de caráter meramente exploratório. Ele resolveu, então, escrever uma carta a seu amigo e professor Niels Bohr, na época diretor do Instituto de Física Teórica da Universidade de Copenhague, explicando suas ideias sobre a medição de campos e solicitando seus comentários. Nesta carta, ele disse:

Em meu curso aqui [em Chicago], considere também como se pode elucidar (*erläutern*) as relações de incerteza para as amplitudes de onda [isto é, para o campo eletromagnético]. Eu considere um possível esquema,³¹ mas não estou satisfeito com ele; acredito que ele esteja

²⁹Heisenberg. *The Physical Principles of Quantum Theory*, *op. cit.*, pp. 48-54, em particular pp. 52-54.

³⁰Cf. Rosenfeld na entrevista de Oskar Klein por John Heilbron e Léon Rosenfeld, 28.02.1963, OH.

³¹Heisenberg se refere ao esquema que explicamos acima, no qual mede-se o campo eletromagnético por meio da análise de sua ação sobre um feixe de elétrons.

somente parcialmente correto.”³²

Bohr, com quem Heisenberg tinha discutido detidamente o microscópio de raios γ , tinha uma perspectiva bastante diferente de Heisenberg acerca do uso de experimentos de pensamento. Ele via nos experimentos de pensamento não as definições operacionais, ou a busca de uma intuitividade, mas sim uma explicação de porque diferentes conceitos (tais como posição e momento linear, ou diferentes componentes do campo eletromagnético) não podem ser observados simultaneamente. Bohr estava interessado em compreender como certos aspectos dos fenômenos físicos se excluíam mutuamente.

A fim de expressar essa mútua exclusão, Bohr criou, em 1928, o conceito de “complementaridade”.³³ Segundo ele, a mecânica quântica nos mostra que existem pares de conceitos, ditos complementares (por exemplo, posição e momento linear), que são ambos necessários para a descrição completa dos processos físicos, mas que não podem ser medidos simultaneamente. As análises de experimentos de pensamento permitiam, assim, compreender melhor como esta exclusão ocorria. O ponto central para Bohr era analisar a *consistência* entre as limitações da teoria e as limitações existentes nas análises das possibilidades de medição.³⁴

Conforme afirma, muito precisamente, Rosenfeld em um texto de 1963,

A famosa discussão de Bohr [de 1928] acerca do processo de medição (...) revelou a origem das limitações recíprocas, expressadas pelas ‘relações de incerteza’, na determinação de quantidades pertencentes aos modos complementares de descrição. Ele pôde rastrear todas estas limitações à lei do quantum de ação, aplicando-a à interação entre o sistema investigado e o aparato de medida: é a natureza quântica da interação que nos impede de controlar com acurácia ilimitada os dois tipos complementares de comportamento do sistema.³⁵

³²Carta de Heisenberg para Bohr, 16.06.1929. BC, 120-62. Cópia em NBCW7, pp. 437-440.

³³Bohr, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Nature (Supplement), v. 121, pp. 580-590, 1928. Reproduzido em NBCW7.

³⁴Cf. Darrigol, Olivier. **Revue de Ulrich Röseberg Niels Bohr: Leben und Werk eines Atomphysikers**. Revue d’Histoire des Sciences, v. 40, n. 1, pp. 139-140, 1987.

³⁵Rosenfeld, Léon. **Matter and Force After Fifty Years of Quantum Theory**. In: S.K. Runcorn (ed). Physics in the Sixties. London: Oliver & Boyd, 1963, pp. 1-22. Reproduzido em SPLR, pp. 247-265, citação na página 263. Nas palavras do próprio Bohr: “Segundo a teoria quântica, a impossibilidade de desprezar a interação com o agenciador da medição [isto é, o aparato de medição] significa que toda observação introduz um novo elemento incontrollável.” Bohr.

Bohr assimilou de Heisenberg esta ideia que toda medição perturba de modo incontrollável o sistema. Conforme foi mostrado por Mara Beller, esta premissa acerca da “perturbação incontrollável” esteve no cerne dos argumentos de Bohr de 1927 a 1935, quando, em função da discussão que teve com Einstein, ele teve que abrir mão desta ideia.³⁶ Das discussões com Heisenberg, Bohr assimilou também o enfoque nos instrumentos de medição. A partir de então, analisar a medição é uma tarefa que envolve, sobretudo, analisar os modos como os instrumentos de medição são usados.³⁷

É fundamental observar que esta dívida de Bohr para com Heisenberg não significa, de modo algum, que a complementaridade seja uma consequência das relações de incerteza. Nenhuma é fruto da outra. Tanto a complementaridade (criada por Bohr) quanto as relações de incerteza (criadas por Heisenberg) têm a sua origem no mesmo lugar: nas análises das possibilidades de medição.

Estas análises da medição tinham como objetivo final, para Bohr, estabelecer uma interpretação da teoria. Ao contrário de Heisenberg, Bohr acreditava que era necessário um esforço interpretativo. A interpretação não estava dada, mas sim deveria ser estabelecida.³⁸ A medição tinha um papel fundamental nesse estabelecimento. Ao observar como ela é feita, é possível compreender como se processa a mútua exclusão dos conceitos complementares e, com isso, compreender a utilização dos conceitos clássicos na descrição dos resultados experimentais. O cerne da interpretação da mecânica quântica é o processo de medição e a complementaridade dele revelada. A complementaridade não é uma concepção filosófica arbitrária adicionada à teoria quântica, mas é algo que surge da própria teoria.³⁹

Isto posto, é compreensível que Bohr tenha se interessado muito pela carta de Heisenberg acerca da medição de campos quânticos. O seu interesse tornou-se ainda maior em 1931, quando da publicação de um artigo de dois jovens físicos, Lev Landau e Rudolf Peierls.

The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory, *op. cit.*, p. 584.

³⁶Beller. **Quantum Dialogues**, *op. cit.*, pp. 155-160. Cf. também Kojevnikov, Alexei. **The Last Century of Physics**. *Annals of Science*, v. 59, pp. 419-422, 2002, em particular pp. 420-421

³⁷Tanoma. **Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope**, *op. cit.*, p. 484.

³⁸Cf. *ibid.*, p. 486. Cf. também Beller. **Quantum Dialogues**, *op. cit.*, pp. 107-110, em particular p. 109.

³⁹Cf. Darrigol. **Revue de Ulrich Röseberg**, *op. cit.*

A crítica de Landau e Peierls

A teoria quântica de campos, que hoje em dia é uma teoria bastante bem estabelecida, foi bastante criticada, por um longo tempo, pelo fato de sofrer de um grande problema: a ocorrência de quantidades infinitas em alguns cálculos. Esses infinitos minavam os cálculos, privando os físicos de obterem valores finitos para algumas grandezas físicas bem definidas. Esse problema permaneceu sem solução até o final dos anos 1940, quando os termos com valores infinitos foram interpretados e métodos sistemáticos para lidar com eles foram inventados.⁴⁰ Durante os anos 1930 e 1940, os físicos tentaram resolver esse problema. Muitos deles, a fim de isolar as pragas que assolavam a teoria, buscaram a origem do problema.

Segundo Lev Landau e Rudolf Peierls, a origem de todos os problemas da teoria quântica do eletromagnetismo era o conceito de campo quântico, que eles alegavam ser desprovido de sentido.⁴¹ A ideia central subjacente à argumentação de Landau e Peierls está em uma frase de Bohr: “a consistência [da mecânica quântica] somente pode ser julgada por meio de uma comparação entre as possibilidades de definição e de observação”.⁴² Podemos construir um esquema explicitando o modo com que Landau e Peierls leram esta frase:

$$\begin{array}{ccc}
 [\hat{A}, \hat{B}] = \dots & \implies & \Delta A \Delta B \geq \dots \\
 & & \Updownarrow \text{ (comparação) } \\
 \text{medição} & \implies & \Delta A \Delta B \gtrsim \dots
 \end{array} \tag{2.5}$$

Havia, por um lado, o formalismo matemático, com seus comutadores, os quais forneciam certas relações de incerteza. Por outro lado, havia a análise de medição, que fornecia outras relações de incerteza. As incertezas obtidas pelos dois métodos deveriam ser iguais. Caso não fossem, a teoria não seria consistente e deveria ser descartada. Ou seja, eles leram a questão da consistência como

⁴⁰Cf. Schweber. **QED and the men who made it**, *op. cit.*, pp. 595-605. Cf. também Rueger, Alexander. **Attitudes towards Infinities: Responses to Anomalies in Quantum Electrodynamics**. HSPS, v. 22, n. 2, pp. 309-337, 1992.

⁴¹Landau & Peierls. **Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie**, *op. cit.* Cf. Kalckar. **Measurability problems in the quantum theory of fields**, *op. cit.*, pp. 139-143.

⁴²Bohr. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**, *op. cit.*, p. 580.

sendo um critério de seleção de teorias.

Baseando-se nesse método de seleção de teorias e na medição de campos desenvolvida por Heisenberg, eles elaboraram um novo experimento de pensamento para medir o campo eletromagnético. A ideia era verificar se a teoria quântica do campo eletromagnético era consistente. O sistema, absolutamente simples, era um elétron sendo acelerado por um campo eletromagnético, cujo valor deveria ser determinado a partir do movimento do elétron. Partindo da relação de incerteza entre energia (\mathcal{E}) e tempo (t),

$$\Delta \mathcal{E} \Delta t > \hbar , \quad (2.6)$$

e levando em consideração a reação de radiação do elétron, eles obtiveram incertezas para a medição de cada componente do campo elétrico (E_i),

$$\Delta E_i > \frac{\sqrt{\hbar c}}{(c \Delta t)^2} . \quad (2.7)$$

A mesma expressão foi obtida para o campo magnético. Estas desigualdades são incertezas na medição de uma única componente do campo eletromagnético – não relações de incerteza entre pares de grandezas, tal qual esperado a partir do formalismo teórico. Ou seja, as incertezas por eles obtidas não têm contrapartida na teoria, mostrando que a teoria quântica do campo eletromagnético não é uma teoria consistente.

Eles obtiveram também as incertezas

$$\Delta E_i \Delta H_j > \frac{\hbar c}{(c \Delta t)^2} \frac{1}{(\delta l)^2} , \quad (2.8)$$

que mostram que para tempos grandes o campo elétrico e o campo magnético podem ser determinados com absoluta precisão, contrariando as incertezas obtidas a partir das regras de comutação da teoria.

Deste modo, Landau e Peierls reivindicaram que as limitações induzidas pela reação de radiação da carga de teste à medição de um campo eletromagnético quântico eram tão restritivas

que não havia concordância entre o formalismo da teoria quântica do campo eletromagnético e as possibilidades de medição do mesmo. Isso viola o princípio básico da mecânica quântica segundo o qual é possível se construir certas situações experimentais nas quais se sabe com certeza o estado do sistema.⁴³ Falar de campos na teoria quântica do eletromagnetismo era tão sem sentido quanto falar de trajetórias na mecânica quântica da partícula. Assim, eles concluíram que a teoria existente na época deveria ser descartada. Segundo eles, “na teoria quântica relativística correta (a qual ainda não existe), não haverá, portanto, quantidades física e medições no sentido da mecânica ondulatória”.⁴⁴

Portanto, segundo eles *a análise da medição de um campo quântico mostrava que a teoria quântica do campo eletromagnético não era uma teoria consistente, sendo isto o suficiente para descartar a teoria como um todo*.⁴⁵

A resposta de Bohr e Rosenfeld

Bohr criticou veementemente esse trabalho de Landau e Peierls, tanto antes como depois da sua publicação. Ele não podia aceitar esta conclusão, uma vez que ela resultaria no abandono da eletrodinâmica quântica e do método usado para a sua construção, o princípio da correspondência. Ademais, o artigo foi escrito em Copenhague, durante uma visita de Landau e Peierls ao Instituto, o que agravava ainda mais a situação, exigindo uma resposta de Bohr.

Em colaboração com Léon Rosenfeld, ele começou, em 1931, um longo esforço a fim de responder as críticas de Landau e Peierls. O resultado final foi publicado nos anais da Academia Dinamarquesa de Ciências em setembro de 1933. Trata-se de um artigo longo, de 65 páginas, escrito em alemão, como era de praxe na época, com argumentos bastante sofisticados, contas parcialmente explicitadas, diversas digressões epistemológicas e inúmeras referências intertextuais relativas aos problemas da teoria quântica de sua época. Podemos afirmar, sem dúvida, que trata-se de um dos artigos de mais difícil leitura da física do século XX. Desde sua publicação em

⁴³Cf. Osnaghi, Stefano. *A Dissolução Pragmático-Transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica*. Cadernos de História e Filosofia das Ciências, Série 3, v. 15, pp. 79-124, 2005, em particular p. 80.

⁴⁴Landau & Peierls. *Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips*, *op. cit.*, citação p. 69.

⁴⁵Usaremos itálico a fim de frisar as opiniões dos físicos acerca do uso da medição de campos quânticos.

1933 até a década de 1970, esse artigo foi repetidamente chamado de “clássico”, “impenetrável”, “primoroso”.⁴⁶

Apesar da sua complexidade, o resultado final do artigo é bastante simples: a eletrodinâmica quântica é uma teoria consistente. Isto significa que há concordância entre a definibilidade e a mensurabilidade do campo eletromagnético. Portanto, o conceito de campo eletromagnético quântico é munido de sentido e pode-se confiar nas contas com ele realizadas. O artigo de 1933 pôs fim à controvérsia iniciada três anos antes de modo conservador: a teoria quântica do campo eletromagnético não deve ser substituída.⁴⁷ Os problemas que a acometem são pontuais e devem ser resolvidos no contexto da teoria. Assim, não se deve buscar uma nova teoria quântica do campo eletromagnético e nem tampouco uma nova teoria quântica sem medições no sentido usual.

Vejamos agora qual foi a resposta de Bohr e Rosenfeld. Primeiro, é fundamental deixarmos claro que trata-se de um problema de cunho epistemológico e não voltado a questões computacionais. Ou seja, a discordância diz respeito, sobretudo, a questões relativas ao modo como se mede campos e ao papel a ser dado à análise de consistência da teoria.

A postura inicial de Bohr foi descrita de modo muito preciso por Heisenberg em uma carta a Pauli:

A crítica de Bohr ao trabalho de Landau e Peierls é bastante interessante. Bohr concorda com as relações de incerteza do artigo de Landau e Peierls. Ele considera a sua demonstração imprecisa em algumas partes, mas esse ponto não é essencial. A crítica principal é direcionada às conclusões que Landau e Peierls tiram das relações de incerteza. Bohr pensa que as relações de incerteza não significam de modo algum que a mecânica ondulatória relativística é muito limitada e tem que dar espaço a um formalismo mais geral.⁴⁸

Bohr e Rosenfeld se voltaram, então, a um estudo minucioso dos argumentos de Landau e

⁴⁶Bohr & Rosenfeld. *Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen*, *op. cit.*

⁴⁷Neste sentido, é curiosa a fala de Bohr a Pauli: “Eu receio que [a minha atitude] pareça, em um primeiro momento, muito reacionária”. **Carta de Bohr para Pauli**, 15.02.1934, BC, 254-74. Cópia em NBCW7, pp. 31-35, citação p. 33. Bohr se refere aqui a uma parte da argumentação de seu artigo com Rosenfeld (relativa ao fato de eles desconsiderarem a composição atômica do aparato de medida), mas esta afirmação poderia facilmente representar toda a atitude geral do artigo. Vale lembrar aqui a citação de Karl Hall no final da nota de rodapé 17 deste capítulo.

⁴⁸**Carta de Heisenberg para Pauli**, 12.03.1931. NBCW7, pp. 441-2

Peierls. O modo como eles seriam contornados não estava claro nesse primeiro momento. No decorrer desse estudo, Bohr e Rosenfeld encontraram inúmeros erros na argumentação de Landau e Peierls, que acabaram não somente por minar a conclusão dos dois físicos, mas também por minar as relações de incerteza por eles propostas.

O ponto central da resposta foi mostrar como a reação de radiação da carga de teste pode ser eliminada. Primeiro, Bohr e Rosenfeld mostraram que se a carga de teste for considerada macroscópica, a reação de radiação pode ser consideravelmente reduzida. Aqui, macroscópico significa que a constituição atômica da carga de teste pode ser desprezada. Depois, eles mostraram que é possível construir um mecanismo compensatório que elimine o resto da reação de radiação. Por fim, a reação de radiação não influencia em nada a medição, ficando claro que Landau e Peierls não efetuaram a melhor medição possível. Esta era a crítica central: é necessário se fazer a melhor medição possível e isto não foi feito por Landau e Peierls.

Sem ter mais que levar em conta a reação de radiação, é possível se realizar medições do campo eletromagnético quântico de modo muito similar às contas levadas a cabo por Heisenberg. Este efetuara uma medição demasiadamente simples, cometendo assim alguns erros, os quais foram corrigidos por Bohr e Rosenfeld. Desde modo, eles mostraram que as limitações na mensurabilidade do campo eletromagnético estão em concordância com as relações de incerteza deduzidas do formalismo matemático da eletrodinâmica quântica. A teoria quântica do campo eletromagnético era, pois, consistente. Desde modo, eles puderam neutralizar as críticas de Landau e Peierls.

Nós podemos agora nos perguntar qual era o papel que Bohr e Rosenfeld davam à medição de campos quânticos no seu artigo. O primeiro era *restaurar a consistência da eletrodinâmica quântica, ou seja, o equilíbrio entre os conceitos definidos na teoria e a possibilidade de suas medições*.⁴⁹ Segundo Bohr, isto mostrava que *o princípio da correspondência estava assegurado*.⁵⁰ O segundo papel era *mostrar como o aspecto macroscópico da carga de teste está relacionado ao uso de conceitos clássicos na teoria quântica*.⁵¹ O terceiro e último papel era *mostrar a pos-*

⁴⁹*Ibid.*, p. 64 [NBCW7, p. 120].

⁵⁰Cf. **carta de Bohr para Heisenberg**, 22.05.1935, BC, 120-154. Cópia em NBCW7, pp. 450-455.

⁵¹**Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen**, p. 47 [NBCW7, p. 103]. Cf. também Bokulich. **Horizons of Description**, *op. cit.*, em particular pp. 9-53, *passim*.

sibilidade de separar a medição na teoria quântica e a constituição atômica, a qual não tinha papel algum a desempenhar na medição.⁵² Portanto, o processo de medição da teoria quântica de campos é descorrelacionado dos problemas de divergência da teoria.

Ainda que tenha se preocupado em responder ao trabalho de Landau e Peierls, Bohr não concordava com o uso que eles tinham feito do conceito de campo quântico. Não havia para Bohr nenhum propósito judicativo da medição sobre a teoria e a consistência não deveria ser analisada como critério de seleção de teorias. Na conferência de Solvay de 1933, ele disse:

Difícilmente nós poderíamos, a partir de considerações acerca da medição, encontrar argumentos contra a teoria (...) [quântica] de campos. A importância das discussões sobre medição é que nós podemos vir a conhecer uma série de coisas acerca do caráter das restrições no uso das imagens clássicas.⁵³

Uma afirmação ainda mais enfática pode ser encontrada em um manuscrito de Bohr e Rosenfeld de 1937,

A investigação do problema da medição não pode, em um formalismo consistente, levar a nenhum argumento tendendo a expor defeitos lógicos da teoria e à necessidade de se alterar os seus princípios. O único interesse do problema da medição é clarificar o aspecto lógico da definição e do uso de conceitos compatíveis com o formalismo; e assim chamar a nossa atenção a alguns aspectos desse formalismo que, de outro modo, passariam despercebidos de nossa investigação, e que são aspectos bastante fundamentais de sua consistência lógica.⁵⁴

Por fim, há duas observações importantes que devemos fazer.

Primeiro, é necessário deixar claro como surgem as incertezas do campo no artigo de Bohr e Rosenfeld. Elas não migram, como nos casos de Heisenberg e Landau-Peierls, do aspecto quântico do aparato de medida. As incertezas do campo eletromagnético aparecem, no artigo de 1933,

⁵²Cf. **carta de Bohr para Pauli**, 15.02.1934, BC, 254-74. Cópia em NBCW7, pp. 31-35.

⁵³Bohr na conferência de Solvay de 1933, *apud* Darrigol. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique**, *op. cit.*, pp. 176-177. Darrigol analisa em detalhes este ponto. Conforme ele observa, esta frase de Bohr é em certo sentido uma auto-crítica de Bohr. Cf. também Jacobsen. **Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics**, *op. cit.*, pp. 387-388.

⁵⁴Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Field and Charge Measurements in Quantum Theory**. In: NBCW7, pp 195-209, citação p. 209. A frase “em um formalismo consistente” é utilizada aqui de modo meramente retórico e não restritivo.

explicitamente relacionadas à incontrolabilidade da interação entre o campo e o aparato de medida (isto é, a carga de teste). Esta incontrolabilidade é produzida pelas flutuações do campo eletromagnético. Entretanto, há aqui uma equivalência que precisa ser enfatizada. É possível mostrar que as flutuações do campo estão ligadas às flutuações de posição e momento linear da carga de teste. Ou seja, seria possível olhar o problema de outro ponto de vista, atribuindo o aspecto quântico do campo à carga de teste. Bohr estava ciente disso, conforme fica claro em uma carta a Pauli:

A ideia de que o conceito de campo deve ser usado com muito cuidado fica evidente também quando lembramos que todos os efeitos do campo podem, em última instância, ser observados somente por meio de sua ação na matéria. Assim, como Rosenfeld e eu mostramos, é impossível decidir se as flutuações do campo já estão presentes no espaço vazio ou se foram criadas pelos corpos de teste.⁵⁵

Esta ideia, tão importante, infelizmente não entrou no texto final do artigo de 1933. Talvez, se Bohr e Rosenfeld tivessem sido mais claros sobre esse ponto, boa parte das discussões do século XX acerca da medição de campos quânticos teriam sido evitadas.

Um segundo ponto que vale frisarmos é o fato de Mara Beller, em seu clássico estudo sobre Bohr, ter ignorado completamente o artigo de 1933. Ela estabelece uma divisão do pensamento de Bohr entre antes de 1935 e após 1935. O divisor de águas teria sido, segundo ela, o acirrado debate com Einstein, sobre o paradoxo EPR, ocorrido nesse ano.

Após 1935, como resposta ao desafio [de Einstein], Bohr abandonou a terminologia e a imagem subjacente [à ideia de] perturbação. O problema de realidade e o da causalidade tornaram-se desassociados, e Bohr fez uma reviravolta nas suas opiniões sobre a natureza da medição. Em contraste com uma simetria anterior entre medição e medido, Bohr introduziu a ideia de uma distinção fundamental entre a natureza dos objetos atômicos e aquela dos instrumentos de medição. Nos escritos posteriores de Bohr, um instrumento de medição precisa ser clássico, “pesado”, e a sua constituição atômica tem que ser, “por princípio”, desconsiderada. A interação da medição não pode ser separada do fenômeno (...): ‘O aspecto essencialmente novo na análise quântica do fenômeno é essencialmente a introdução do *aparato de medição e dos*

⁵⁵ **Carta de Bohr para Pauli**, 15.02.1934, BC, 254-74. Cópia em NBCW7, pp. 31-35, citação p. 34. Traduzido para o português a partir da tradução inglesa. Original em dinamarquês em NBCW7, pp. 470. A relevância deste ponto já foi observada por Rugh, Svend E. & Zinkernagel, Henrik. **The Quantum Vacuum and the Cosmological Constant Problem**. SHMP, v. 33, n. 4, pp. 663-705, 2002, em particular pp. 683-684.

objetos sob investigação. Esta é uma consequência direta da necessidade de se explicar a função dos instrumentos de medição em termos puramente clássicos, excluindo, por princípio, qualquer menção ao quantum de ação'.⁵⁶

Conforme mencionamos acima e, sobretudo, como foi mostrado cuidadosamente por Kalckar, Darrigol, Miller, Bokulich e Jacobsen, esta avaliação de Beller está equivocada. A única frase do texto acima que pode ser correta é a primeira; todas as suas frases seguintes estão erradas (com exceção, obviamente, da citação de Bohr). Esta mudança no pensamento de Bohr que ela atribui ao debate com Einstein já estava presente – e de modo muito claro – no artigo de Bohr e Rosenfeld. Talvez seja hora dos exegetas de Bohr darem a devida atenção ao artigo de 1933.

A pluralidade de pontos de vista entre 1930 e 1933

Como vimos, desde o início desses debates, havia uma pluralidade de modos de se usar uma medição de campo quântico.⁵⁷ Heisenberg estava preocupado com definições operacionais e *anschaulichkeit*; Landau e Peierls estavam preocupados com a análise de consistência da teoria e com a justificativa do descarte de teorias; Bohr e Rosenfeld estavam preocupados com a consistência e a utilização de conceitos complementares na descrição da medição.

Poderíamos suspeitar que a existência de tal pluralidade provém de uma imperfeição do conceito de medição de campos quânticos, o qual deveria ser definido mais precisamente – de um modo “claro e distinto”, como na célebre formulação cartesiana. Entretanto, isso não seria correto. A pluralidade dos usos da medição de campos quânticos não foi um aspecto negativo, uma vez que cada um desses usos desempenhou um papel relevante no modo como cada um desses físicos abordou a teoria quântica dos campos. Aqui, não estamos interessados em julgar, mas sim em compreender as relações entre os modos como os físicos usaram a medição de campos quânticos e as suas posturas mais gerais com relação à organização matemática e epistemológica das teorias físicas.

⁵⁶Beller. *Quantum Dialogues*, *op. cit.*, pp. 90-91.

⁵⁷Uma conclusão similar foi apresentada por Jacobsen, cf. observação de David Kaiser em *Comments on “Interpreting quantum mechanics: a century of debate”*, *op. cit.*, p. 3.

2.3 A medição dos campos quânticos após Bohr e Rosenfeld

O debate acerca da medição dos campos quânticos ecoou muito além de Copenhague. Nesta seção 2.3, apresentaremos vários físicos que foram inspirados por esse debate, em particular pelas ideias de Bohr e Rosenfeld. Começamos analisando como os debates de Copenhague foram recebidos e discutidos na França e na União Soviética. Depois, discutiremos a recepção das ideias de Bohr e Rosenfeld na década de 1950, sobretudo nos Estados Unidos.

Partidários da pequena guerra em Paris

O fato do epicentro da “pequena guerra” ter sido em Copenhague não significa que ela não tivesse os seus partidários em outros lugares. Em Paris, o jovem físico Jacques Solomon alinhou-se a Bohr e Rosenfeld na defesa da teoria quântica, enquanto Louis de Broglie, recém laureado pelo prêmio Nobel, tomou o partido de Landau e Peierls.

Solomon, apesar de contar somente com 23 anos em 1931, era na época a principal voz da teoria quântica de campos na França. Amigo próximo de Rosenfeld e genro de Paul Langevin, ele tinha as suas particularidades interpretativas da teoria quântica.⁵⁸

Por exemplo, a maneira como ele interpretava as relações de incerteza de Heisenberg era ligeiramente diferente das interpretações existentes em Copenhague. Solomon reconhecia esta diferença. Ele reivindicava para si a abordagem de Langevin, cujas “ideias acerca do princípio da incerteza de Heisenberg foram para [ele] um guia muito seguro”.⁵⁹ Em sua tese, defendida em novembro de 1931, ele explica que

a interpretação física [das relações de incerteza] ficou hesitante por tempo demais. Algumas pessoas proclamaram a falência do determinismo. Mas a interpretação atual é que se trata somente de ter ficado manifesto um defeito da nossa representação, uma incapacidade de nossos modelos: onda ou corpúsculo, a depender dos comportamentos dos fenômenos observados experimentalmente. Todo fenômeno pode ser representado de modo mais ou menos complicado

⁵⁸Para uma análise biográfica de Solomon, cf. Bustamante, Martha Cecilia. **Jacques Solomon**: Profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente. *Revue d'histoire des sciences*, v. 50, n.1-2, pp. 49-87, 1997.

⁵⁹Solomon, Jacques. **L'électrodynamique et la théorie des quanta**. Paris: Masson, 1931, p. 4.

na linguagem ondulatória ou na linguagem corpuscular. As dificuldades conhecidas como princípio da incerteza surgem somente quando associamos as duas representações.⁶⁰

Assim, para Solomon, a relação de incerteza não reflete uma perda do determinismo, ou uma característica intrínseca da natureza, mas sim uma limitação na linguagem utilizada na modelagem dos fenômenos. Foi com esta perspectiva que, em 1931, na sua tese, ele comentou as ideias de Heisenberg acerca da medição dos campos quânticos.

Nós sabemos, após o trabalho de Heisenberg [de 1927], que é impossível medir simultaneamente a posição e a velocidade de um elétron. Como [os campos elétrico] E e [magnético] H são definidos exatamente por meio de um elétron, e se nós levarmos em conta o princípio fundamental da mecânica quântica, de utilizar somente grandezas que sejam mensuráveis, nós somos conduzidos a admitir que E e H não podem ser medidos simultaneamente. (...) Isto nos conduz imediatamente à teoria da quantificação dos campos, cuja necessidade nós esperamos ter assim demonstrado.⁶¹

Ou seja, como a determinação do campo eletromagnético envolve a determinação simultânea da posição e do momento linear de um elétron, grandezas estas que fazem parte de representações distintas, faz-se necessário que os campos elétrico e magnético façam parte também de duas representações distintas, as quais não podem ser associadas sem dificuldades. O único modo de resolver estas dificuldades é fornecendo uma quantização para o campo eletromagnético. A quantização deste é, portanto, necessária. A necessidade da quantização não deve ser vista como algo ontológico, mas sim como o reconhecimento das limitações de nossas representações. Esta foi a conclusão do capítulo 1 da tese de doutorado de Solomon. Nesse raciocínio, *a medição de campos quânticos permite estabelecer relações entre diferentes representações dos sistemas físicos*.

O artigo de Landau e Peierls foi publicado na mesma época em que Solomon concluía a escrita de sua tese. Este artigo ganhou relevância em Paris quando, no final de 1931, ele foi lido por Louis de Broglie. Ele também tinha, àquela época, suas restrições acerca da teoria quântica de campos e

⁶⁰*Ibid.*, p. 5.

⁶¹*Ibid.*, p. 2.

fez coro às críticas apresentadas pelos dois físicos.⁶² De Broglie decidiu, então, fazer uma tradução comentada e ampliada do artigo em francês.

A tradução foi publicada no início de 1932 na série *Actualités Scientifiques et Industrielles*, a qual fora criada três anos antes por de Broglie, Jean-Louis Destouches e André George, com o propósito de publicar em pequenos volumes explicações para a comunidade de físicos franceses dos mais importantes desenvolvimentos da física do período, indicando os principais temas aos quais os pesquisadores deveriam voltar as suas atenções. A tradução era bastante acurada, apresentando aos físicos franceses de modo bastante preciso a crítica do artigo de Landau e Peierls.⁶³

O texto de de Broglie provocou a reação de ao menos um pesquisador: Solomon. Após a publicação da tradução, ele decidiu responder à provocação em defesa da teoria quântica de campos. O ano era 1932, quando o argumento de Landau e Peierls não tinha ainda nenhum oponente público. O artigo de Solomon, que foi publicando antes do artigo de Bohr e Rosenfeld, teve um fim bem diferente daquele previsto pelo autor. Trata-se de uma admissão de fracasso. Ele não pode eliminar completamente a reação de radiação da carga de teste, ainda que tenha conseguido minimizá-la consideravelmente. A sua conclusão foi que Landau e Peierls não fizeram a melhor medição possível do campos eletromagnético, ainda que ele, Solomon, não tenha conseguido fazer muito melhor. Não tendo concluído a demonstração, ele transformou o seu artigo em um manifesto contra o processo de medição formulado em termos de experimentos de pensamento:

Podemos estar certos, a priori, que é possível encontrar uma experiência que esteja em acordo com as relações de comutação da teoria de Heisenberg e Pauli. De modo geral, parece que seja difícil fazer progressos na teoria baseando-se em “experiências ideais”, uma vez que a demonstração fica sempre por ser feita. Parece, de modo geral, bastante complicado [mostrar que] nós fizemos a melhor experiência possível. As “experiências ideais” servem para concretizar os resultados da teoria, parece muito pouco provável que elas possam precedê-los.⁶⁴

⁶²Para a opinião de de Broglie acerca da teoria quântica de campos, cf. Vila Valls, Adrien. **Louis de Broglie et la Diffusion de la Mécanique Quantique en France (1925-1960)**. Thèse de Doctorat en Histoire, Philosophie et Didactique des Sciences, Université Lyon I, Lyon, França, Novembro 2012, em particular pp. 71-82.

⁶³Broglie, Louis de. **Sur une forme plus restrictive des relations d'incertitude**. *Actualités Scientifiques et Industrielles*, v. XXXI. Paris: Hermann et Cie Éditeurs, 1932.

⁶⁴Solomon, Jacques. **Remarques sur la théorie du rayonnement**. *Journal de Physique et le Radium*, v. 4, n. 7, p. 368-387, 1933, citação p. 386.

A expressão “experiências ideais” é o nome usado por Solomon para “experimentos de pensamento”. Esta nomenclatura frisa o fato do experimento de pensamento ser uma situação ideal, na qual se constrói *a melhor medição possível*. A pergunta, muito justa, posta por Solomon é: como saber se fizemos a melhor medição possível? Bohr e Rosenfeld diriam que é necessário compensar tudo que for possível se compensar. Entretanto, como saber se fomos exaustivos? Isso Bohr e Rosenfeld não dizem. Este sentimento de desconforto era compartilhado por outros físicos.⁶⁵

O cerne da resposta de Solomon é ainda mais crítico. Ele não concordava com o argumento de Landau e Peierls, pois eles pressupunham uma dimensão judicativa do experimento de pensamento sobre a teoria. Nisso, como vimos, Solomon se aproxima de Bohr e Rosenfeld. Entretanto, ele defende esse argumento a partir de um ponto de vista absolutamente diferente. Ele acreditava que a consistência do formalismo é dada *a priori*, como resultado dele ter sido obtido e não depende de análises de medição. Ele diz:

As relações [de incerteza advindas do formalismo] provêm da teoria de Pauli e Heisenberg; esta estabelece uma solução muito satisfatória do problema, que consiste em introduzir uma velocidade finita na propagação da luz no formalismo da mecânica quântica. É, portanto, *a priori* muito inverossímil que os dois métodos possam dar resultados diferentes.⁶⁶

Para Solomon, usar os experimentos de pensamento para julgar a teoria matemática seria dizer que a concretização precederia, em termos de credibilidade, a abstração. Segundo Solomon, isto não faria sentido, pois é necessário que haja uma primazia do abstrato (a teoria matemática) sobre o concreto (o experimento de pensamento). Conforme ele diz, “as ‘experiências ideais’ servem para

⁶⁵Oscar Klein disse: “Eu não acho que qualquer pessoa era capaz de lidar com [os experimentos de pensamento] com a exceção de Bohr e daqueles que estavam em uma conexão muito próxima com ele. Bohr e Rosenfeld fizeram um trabalho muito bonito (*very beautiful work*), você sabe, sobre eletrodinâmica quântica. Havia uma enorme quantidade de artigos errados sobre este assunto também. Nos anos seguintes [ao artigo de Bohr e Rosenfeld], eu sempre achei que eu não participaria (*get into*) desses assuntos. Eles são tão difíceis de não participar, você entende. Eu quero dizer, é muito fácil obter uma incerteza, mas a questão é obter a menor incerteza, o melhor modo de medir as coisas.” Entrevista de Oskar Klein por Thomas Kuhn e John Heilbron, 16.07.1963, OH. Vale observar que Klein, alguns meses antes, tinha dito também: “Estas experiências [de pensamento de Heisenberg, Bohr e Rosenfeld] me levaram a sentir que era muito difícil discutir corretamente estas questões de observação. Eu lembro que aconteceu de um dia alguns dos meus alunos avançados dizerem que queriam fazer algo daquele tipo e então eu os aconselhei muito enfaticamente a não o fazerem. Claro, [Rosenfeld] o fez com Bohr de modo muito afortunado, mas eu não creio que ninguém mais tenha feito tal coisa corretamente”. Entrevista de Oskar Klein por John Heilbron e Léon Rosenfeld, 28.02.1963, OH.

⁶⁶Solomon. *Remarques sur la théorie du rayonnement*, *op. cit.*, citação p. 386.

concretizar os resultados da teoria, parece muito pouco provável que elas possam precedê-los”. Ou seja, *a medição de campos quânticos pode desempenhar o papel de, uma vez estando a teoria quântica de campos já desenvolvida, dar ao cientista uma contraparte concreta da argumentação matemática*.⁶⁷

Esse tipo de argumento coloca Solomon muito próximo do racionalismo francês de sua época, tal como, por exemplo, Gaston Bachelard, para quem o abstrato está, na hierarquia do pensamento, acima do concreto. É interessante observar que Solomon também se aproxima da perspectiva de Heisenberg. O primeiro usa o verbo “concrétiser”, o segundo, “erläutern”. Para ambos, o formalismo matemático vem antes dos experimentos de pensamento; estes têm somente a função de exemplificar aqueles. Solomon e Heisenberg, ainda que tivessem concepções filosóficas absolutamente distintas, concordavam acerca da primazia do formalismo sobre as análises de medição.

Apesar de suas tentativas, Solomon precisou esperar o artigo de Bohr e Rosenfeld para ver a teoria quântica de campos ser liberada das críticas de Landau e Peierls. Alguns anos depois, outro desafio de medição surgiu e ele prontamente defendeu uma vez mais a teoria quântica de campos.

Medições de campos na URSS

Durante o mesmo período, na União Soviética, o artigo de Bohr e Rosenfeld foi mencionado, ao menos, por dois físicos: Vladimir Fock e Matvei Bronstein. Fock, em um artigo bastante renomado, disse que *a análise da medição dos campos quânticos, feita por Bohr e Rosenfeld, “elucidou a região na qual a teoria [da eletrodinâmica quântica] era aplicável”*.⁶⁸ Segundo ele, o domínio de aplicabilidade da teoria estava, assim, estabelecido e os físicos teóricos deveriam, então, voltar as suas atenções para o formalismo matemático, a fim de encontrar uma solução para os infinitos que ainda assolavam a teoria.

⁶⁷ Alguns meses mais tarde, tendo lido o artigo de Bohr e Rosenfeld, Solomon estava já mais simpático ao uso de experimentos de pensamento, ainda que, pelo que se pode inferir do seu raciocínio, ele ainda mantém tacitamente a ideia de que os experimentos de pensamento ilustram as teorias. Cf. Solomon, Jacques. **Sur la définition du spin de l'électron**. *Journal de Physique et le Radium*, v. 5, n. 4, pp. 167-170, 1934.

⁶⁸ Fock, Vladimir. **Zur Quantenelektrodynamik**. *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, Band 6, pp. 425-469, 1934. Citamos a partir da tradução para inglês de E. D. Trifonov em L.D. Faddeev *et alii* (ed). **V.A. Fock selected works: quantum mechanics and quantum field theory**. New York: Chapman Hall, 2004, pp. 331-368, citação p. 332.

Em sua tese de doutorado, concluída em 1935, Bronstein analisou a quantização do campo gravitacional.⁶⁹ Limitando-se à aproximação linear, ele aplicou as relações de comutação de Pauli-Heisenberg ao caso do campo gravitacional.⁷⁰ Então, da teoria quântica assim derivada, ele obteve, como casos limites, a fórmula de Einstein para as ondas gravitacionais e a lei de atração gravitacional newtoniana. Entretanto, Bronstein nunca considerou a aproximação linear como sendo a última palavra no problema da gravitação quântica. Ele estava ciente de que não poderia utilizar os métodos padrões da teoria quântica de campos ao caso do campo gravitacional completo (não-linear), então decidiu abordar esse caso usando as ideias de Bohr e Rosenfeld.

Primeiro, ele desenvolveu uma forma simplificada do processo de medição de Bohr e Rosenfeld, que usou para medir o campo gravitacional quantizado na aproximação linear, obtendo uma incerteza para uma única componente do símbolo de Christoffel:

$$\Delta\Gamma_{00}^1 > \frac{h^{2/3}G^{1/3}}{c^{1/3}\rho^{1/3}V^{2/3}\Delta t} \quad , \quad (2.9)$$

onde ρ é a densidade do corpo de prova e V é o seu volume. O denominador dessa relação cresce com a massa do corpo de prova. Uma vez que na teoria linear não há limite para tal massa, Bronstein argumentou que essa componente poderia ser medido com absoluta precisão na teoria linear. Nas suas palavras:

Nós concluímos, portanto, que é possível construir uma teoria quântica da gravidade consistente no contexto da teoria da relatividade espacial [ou seja, na aproximação de campo fraco]. No domínio da relatividade geral [completa, ou seja, não linear,] na qual os desvios do [espaço-tempo plano] podem ser arbitrariamente grandes, a situação é bastante diferente. Uma vez que o raio gravitacional do corpo de prova utilizado na medição ($G\rho V/c^2$) não deve ser maior que as suas dimensões lineares ($V^{1/3}$), há um limite superior para a densidade ($\rho \lesssim c^2/GV^{2/3}$). [Assim,] as possibilidades de medição são ainda mais limitadas neste domínio do que aquilo que é previsto [a partir dos comutadores da] teoria quântica.⁷¹

⁶⁹Os resultados foram publicados em Bronstein, Matvei. **Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder**. Physikalische Zeitschrift der Sowjet-union, Band 9, Heft 2-3, pp. 140-157, 1936. Há também um segundo artigo correlato à tese que foi publicado em russo, língua que desconhecemos, e portanto não o mencionaremos.

⁷⁰*Ibid.*, p. 144.

⁷¹*Ibid.*, citação pp. 149-150.

Ou seja, Bronstein alegou que na teoria completa, não linear, uma outra expressão deveria aparecer, expressão esta similar àquela por ele obtida no caso da teoria linear; nesse caso, a densidade do corpo de prova teria um limite superior. Portanto, na teoria não linear, que ainda era desconhecida, uma única componente do símbolo de Christoffel seria mensurável com uma precisão finita. Esta era uma nova situação, que não ocorria na eletrodinâmica quântica.

Bronstein concluiu que “sem uma profunda revisão dos conceitos clássicos [da teoria da relatividade geral], parece que dificilmente será possível estender a teoria quântica da gravitação à região [não-linear]”.⁷² Esta era uma afirmação sobre uma teoria desconhecida. Bronstein só pode chegar a tal conclusão ao supor haver uma semelhança entre a medição do campo gravitacional na aproximação linear e na teoria completa não-linear, de tal forma que na teoria não-linear a mensurabilidade do campo gravitacional também dependeria da densidade do corpo de prova. Desse modo, em suas mãos, *a medição dos campos quânticos se tornou um modo de explorar a teoria quântica para além dos limites atuais de aplicabilidade da teoria atual*.⁷³

A segunda batalha de Solomon

Em meados dos anos 1930, três renomados físicos – Walter Heitler, Lothar Nordheim e Edward Teller – formularam um experimento de pensamento bastante ingênuo, com o propósito de mostrar a impossibilidade de se medir o campo gravitacional. Provavelmente cientes da trivialidade do seu argumento, eles nunca o publicaram. Entretanto, George Gamow considerou-o interessante e decidiu reproduzir o argumento em um de seus artigos, publicado em 1937, dando os devidos créditos aos três físicos.⁷⁴

Solomon leu o artigo de Gamow e decidiu atacar o problema. Ele escreveu rapidamente um artigo apoiando a abordagem de Bohr e Rosenfeld à questão da medição dos campos quânticos, e também as ideias de Bronstein acerca da gravitação quântica. Apesar de se propor bohriano em sua abordagem, os argumentos de Solomon são bastante heterodoxos. Ele queria mostrar como era

⁷²*Ibid.*, citação p. 150.

⁷³Gorelik. **Matvei Bronstein and quantum gravity**, *op. cit.*, p. 1046.

⁷⁴Gamow, George. **Über den heutigen Stand der Theorie des β -Zerfalls**. *Physikalische Zeitschrift*, Band 38, pp. 800-814, 1937, em particular p. 814.

possível contornar o argumento de Heitler, Nordheim e Teller, e a fim de fazê-lo, Solomon elaborou alguns experimentos de pensamento mostrando como era possível medir o campo gravitacional. Entretanto, nesses experimentos, Solomon falava de medições de campos quânticos em escalas atômicas. Bohr e Rosenfeld claramente afirmaram que a medição de campos quânticos deveria ser realizada com corpos de teste macroscópicos, uma vez que esta era a escala na qual a aplicação dos conceitos clássicos deveria ser realizada. Solomon enfocou tanto a questão da consistência no debate de 1933 que acabou por não atentar ao aspecto macroscópico do processo de medição.⁷⁵

De 1933 a 1938, Solomon não somente aceitou o uso de experimentos de pensamento, mas também tornou-se um enfático defensor deles. O problema de compreender o porquê de Solomon ter mudado de opinião acerca deste tema não é somente de relevância biográfica, uma vez que isto pode nos indicar como uma opinião acerca da medição de campos quânticos está profundamente relacionada com uma postura filosófica mais profunda. Em 1933, tal como sugerimos, Solomon estava próximo a uma certa corrente do racionalismo francês, o que lhe impedia de dar uma grande importância a experimentos de pensamento, e em particular às medições de campos quânticos. Com o crescimento do fascismo na Europa, Solomon se envolveu com diversos movimentos políticos, em particular, filiando-se, em 1933, ao Partido Comunista Francês. Sob influência de George Politzer e de outros filósofos marxistas, Solomon aderiu à filosofia do materialismo dialético.⁷⁶ A partir deste momento, ele se opôs à escola racionalista francesa, em particular a Bachelard. Em um texto escrito no início dos anos 1940 e publicado postumamente, ele disse que “não é exato declarar, como o faz o Sr. Bachelard, que ‘a verdadeira solidariedade do real é de essência matemática’: é o real, na verdade, que dita e verifica a matemática”.⁷⁷ Assim, podemos ver que a mudança de Solomon acerca da medição de campos quânticos é concomitante a uma mudança filosófica acerca da relação entre matemática e a realidade. Assim, a mudança de perspectiva de Solomon está, ao que parece, relacionada às mudanças políticas do seu tempo.

⁷⁵Solomon, Jacques. **Gravitation et quanta**. Journal de Physique et le Radium, v. 9, n. 11, pp. 479-485, 1938.

⁷⁶Bustamante, Martha Cecilia. **Jacques Solomon et Paul Langevin**: Filiation et différences. Épistémologiques, v. 2, n. 1-2, pp. 177-188, 2002.

⁷⁷Solomon, Jacques. **M. Gaston Bachelard et le «nouvel esprit scientifique»**. La Pensée (Nouvelle Série), v. 2, p. 47-55, 1945, citação p. 51.

Um outro físico francês, Jean Mariani, também ficou sabendo das ideias de Heitler, Nordheim e Teller. Contrariamente a Solomon, ele as recebeu com bastante satisfação. Mariani era um dos muitos físicos dos anos 30 que acreditavam que os problemas das divergências da teoria quântica seriam resolvidos pela inclusão de uma escala de comprimento fundamental. A partir deste ponto de vista, o fracasso na medição do campo gravitacional quântico, tal qual descrito por Gamow, era uma evidência mostrando que a teoria era inconsistente e deveria ser alterada, possivelmente pela introdução de um comprimento fundamental.⁷⁸

O tão esperado segundo trabalho

Depois da publicação do artigo de 1933, Bohr e Rosenfeld iniciaram uma outra colaboração. A teoria quântica postula que a densidade de corrente elétrica seja quantizada, estando sujeita a incertezas. Eles buscaram analisar como estas incertezas apareciam nas análises de medição da carga elétrica.⁷⁹

O artigo, publicado em 1950, levou 17 anos para ficar pronto, devido à distância geográfica entre seus autores e também à ocorrência da Segunda Guerra Mundial. Dado o renome de Bohr e Rosenfeld e dada a demora em ficar pronto, o artigo de 1950 gerou uma grande expectativa. O maior entusiasta foi certamente John Wheeler, um físico norte-americano que era ex-aluno de Bohr. Wheeler esteve muito próximo de Bohr durante esse período, com quem colaborou em suas pesquisas sobre física nuclear, a mais renomada área de pesquisa da época.

Em 1948, Abraham Pais escreveu um livro sobre os últimos desenvolvimentos da teoria do elétron. O argumento de Bohr e Rosenfeld sobre a mensurabilidade da carga elétrica ainda não tinha sido publicado, mas não poderia deixar de ser incluído nesta obra. Assim, Wheeler obteve uma versão preliminar do texto e escreveu um posfácio à obra, explicando o que viria no artigo de Bohr e Rosenfeld que seria publicado em breve.⁸⁰

⁷⁸Mariani, Jean. **Non-euclidean geometry in microscopic space**. *Nature*, v. 143, p. 683, 1939. Sobre as teorias com comprimento fundamental, ver Kragh, Helge. **Arthur March, Werner Heisenberg, and the search for a smallest length**. *Revue d'histoire des sciences*, v. 48, n. 4, pp. 401-434, 1995.

⁷⁹Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Field and Charge Measurements in Quantum Electrodynamics**. *Physical Review*, v. 78, n. 6, pp. 794-798, 1950.

⁸⁰Wheeler, John. **Field and Charge Measurements in Quantum Theory**. In: A. Pais. *Developments in the Theory*

Somente anos mais tarde, Wheeler confessou a Bohr a razão de seu interesse tão profundo no segundo artigo dele com Rosenfeld, conforme explicaremos a seguir.

Medições de campos nos Estados Unidos

Nos final dos anos 1940, os físicos acharam uma solução para os infinitos da teoria quântica de campos chamada renormalização. Ela resolvia o problema de um modo pragmático: pode-se isolar os infinitos, interpretá-los e jogá-los fora dos cálculos, obtendo, por fim, resultados finitos. Apesar de uma certa falta de justificativa, o processo de renormalização funcionava e isso era o que realmente importava.⁸¹ O meio filosófico do pós-guerra permitiu uma solução pragmática para o problema. Neste modo de se fazer física, deve-se acreditar nos resultados teóricos não porque a teoria é consistente, mas porque os cálculos são realizáveis e ajustam adequadamente os dados experimentais. A capacidade de predição quantitativa de uma teoria é o fator judicativo para o seu sucesso. Neste contexto, poderia parecer que a importância dos argumentos de Bohr e Rosenfeld seria consideravelmente reduzido. Entretanto, contrariamente a esta expectativa e a muitos textos de história da ciência acerca desse período, as ideias de Bohr e Rosenfeld não foram esquecidas.⁸²

A análise da medição como ferramenta heurística para estimar flutuações

O mais importante divulgador da medição de campos quânticos foi John Wheeler. Em seu curso de “Advanced Quantum Mechanics” lecionado na pós-graduação em física de Princeton em 1954-1955, ele discutiu minuciosamente o artigo de Bohr e Rosenfeld de 1933.⁸³ A sua análise era bastante técnica, enfocando os cálculos, e não incluía nenhuma discussão acerca do significado do

of the Electron. Princeton: Institute for Advanced Studies Press, 1948, pp. 42-45. Como observou Kalckar, é muito curioso que não haja nenhum ponto em comum entre o resumo de Wheeler e o artigo publicado em 1950. Kalckar. **Introduction**, *op. cit.*, p. 45.

⁸¹Para um panorama acerca do tema, cf. Cao, Tian Yu & Schweber, Sam. **The conceptual foundations and the philosophical aspects of renormalization theory**. Synthese, v. 97, n. 1, pp. 33-108, 1993; Brown, Laurie (ed). **Renormalization: from Lorentz to Landau (and beyond)**. New York: Springer, 1993.

⁸²Enfocaremos os trabalhos escritos nos Estados Unidos, de tal modo que não mencionaremos aqui o artigo de Corinaldesi, Ernesto. **Some Aspects of the Problem of Measurability in Quantum Electrodynamics**. Il Nuovo Cimento, suplemento al v. 10, serie 9, 2, p. 83, 1953.

⁸³Cf. caderno de anotações **Quantum Electrodynamics Notebook** (em particular, pp. 21, 37, 64, 65). WP, V-82. Cf. também as notas de aula **Advanced Quantum Mechanics, Wheeler notes: notes on graduate school course, circa 1955** (em particular a seção 21 do texto). EP, I-1-7.

trabalho de 1933. Poderíamos, pois, pensar que Wheeler não se interessava pela interpretação da medição de campos quânticos, porém esse não era, de fato, o caso.

Em uma carta a Bohr, Wheeler confessou a razão pela qual esteve “sempre tão interessado” nas ideias de Bohr e Rosenfeld.⁸⁴ Ele estava tentando desenvolver uma nova teoria das partículas elementares na qual cada partícula (elétron, próton, pión, nêutron etc) seria composta por sub-partículas positivas e negativas eletricamente.⁸⁵ A única propriedade fundamental da natureza seria a carga elétrica desses blocos fundamentais. Ele sempre fora afeito a teorias altamente especulativas e essa era somente mais uma de suas ideias, na qual ele depositava muitas esperanças. Ele queria primeiro mostrar que tal quadro teórico era viável. Assim, utilizando somente cargas positivas e negativas, ele obteve qualitativamente muitos resultados conhecidos das interações nucleares. Entretanto, havia um problema: “Spin e estatística são absolutamente inconsistentes com essa imagem [das partículas elementares]”, ele se queixou a Bohr, “e a descartam completamente, se nós considerarmos que nêutrons e neutrinos estão realmente isolados uns dos outros”.⁸⁶ Wheeler imaginou uma analogia hidrodinâmica. Do mesmo modo que dois vórtices em um fluido parecem estar isolados mas, na verdade, estão ligados por um campo que satisfaz o teorema da circulação, nêutrons e neutrinos poderiam estar correlacionados de algum modo bastante sutil. Isso resolveria o problema de spin e estatística. Era necessário, portanto, entender como um sistema de cargas positivas e negativas (por exemplo, um nêutron) poderia perturbar um outro sistema de cargas positivas e negativas (por exemplo, um neutrino). A medição de campos quânticos, como uma análise de perturbações, poderia lhe ensinar algo sobre a sua nova teoria.

Essas ideias não vingaram e ele nunca as publicou.⁸⁷ Mesmo assim, ele mencionou algumas vezes o artigo de 1933 em seus trabalhos publicados. Em particular, ele reivindicou que a análise

⁸⁴Carta de Wheeler para Bohr, 21.01.1950. WP, I-5, pasta ‘Bohr, Niels #2’.

⁸⁵O germe dessa ideia já pode ser encontrado em Wheeler, John Archibald & Feynman, Richard Phillips. **Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action**. Reviews of Modern Physics, v. 21, n. 3, pp. 425-433, 1949.

⁸⁶Carta de Wheeler para Bohr, 21.01.1950, *op. cit.*

⁸⁷Essas mesmas ideias o levaram, anos mais tarde, ao projeto denominado “geometrodynamics”. Cf. Wheeler, John Archibald. **Geometrodynamics**. New York: Academic Press, 1962, pp. 225-307. Em função das enormes diferenças entre o projeto inicial e este projeto final, as ideias sobre a medição dos campos quânticos acabaram abandonadas.

de medições de campos, ao fornecer equações do tipo

$$\Delta E \sim \frac{\sqrt{\hbar} c}{(\delta l)^2}, \quad (2.10)$$

poderia indicar a escala das flutuações dos campos quânticos. Ele utilizou a expressão (2.10) em diversos cálculos semi-quantitativos acerca da estabilidade de *geons* – uma onda eletromagnética (ou uma onda gravitacional) mantida em uma região espacial limitada por meio da ação do seu próprio campo gravitacional. Assim, com Wheeler, *a medição de campos quânticos tornou-se uma ferramenta heurística para estimar a ordem de grandeza das flutuações quânticas*.⁸⁸

A análise da medição estabelece uma interpretação da teoria

Hugh Everett estava entre os alunos que frequentou o curso de Wheeler em 1954-1955. Sabemos muito pouco acerca do interesse de Everett no artigo de Bohr e Rosenfeld, entretanto há um notável parágrafo sobre o assunto em sua tese de doutorado. Ele disse:

A função de onda é tomada como sendo a entidade física elementar, sem uma interpretação a priori. A interpretação somente aparece após uma investigação da estrutura lógica da teoria. Aqui, como sempre, a própria teoria estabelece o quadro (*sets the framework*) para a sua interpretação. (Nota de rodapé: veja em particular a discussão desse ponto por Bohr e Rosenfeld [em seu artigo de] de 1933.)⁸⁹

A reivindicação que a teoria estabelece sua própria interpretação é uma reivindicação central do que veio a ser futuramente a interpretação de Everett. É no mínimo curioso que ele a atribua a Bohr e Rosenfeld. Entretanto não é de todo injustificável. Ainda que Bohr e Rosenfeld não tenham dito isto explicitamente em seu artigo, Bohr provavelmente concordaria com a ideia de que a interpretação é algo que se deriva da teoria e não algo que a ela deva ser adicionado.

⁸⁸Cf. Wheeler, John Archibald. *Geons*. *Physical Review*, v. 97, n. 2, pp. 511-536, 1955, em particular p. 514. Cf. também *carta de Wheeler para Bohr*, 24.04.1956. Cópia da carta no caderno **Relativity IV Notebook** (p. 64). WP, V-82. Veja também Wheeler. *Geometrodynamics*, *op. cit.*, p. 76.

⁸⁹Everett, Hugh. “**Relative State**” **Formulation of Quantum Mechanics**. *Reviews of Modern Physics*, v. 29, n. 3, pp. 454-462, 1957, citação p. 142. Cf. Barrett, Jeffrey & Byrne, Peter (ed). **The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary**. Princeton: Princeton University Press, 2012, p. 178. Cf. também rascunho da tese de doutorado intitulado “On the foundations of quantum mechanics, 1957” (p. 9). EP, II-2-3. É possível que esta referência seja um argumento retórico de Everett, posto que ela foi incluída somente na segunda versão da tese, tendo sido publicada na versão final da tese. Para a história das duas versões da tese de Everett, cf. Osnaghi, Stefano *et alii*. **The origin of the Everettian heresy**. *SHMP*, v. 40, pp. 97-123, 2009.

A análise da medição mostra a necessidade da quantização

Everett não foi o único físico a reivindicar que a análise de medição de campos quânticos tinha *o objetivo de limitar as possibilidades de formulações teóricas*. Era muito comum, nesta época, a afirmação de que o artigo de Bohr e Rosenfeld *tinha mostrado a necessidade de se quantizar o campo eletromagnético*. Julian Schwinger disse, em 1956, que

A completa concordância das considerações [de Bohr e Rosenfeld] com as implicações formais das relações de comutação dos operadores indicou a necessidade e a consistência de se aplicar a descrição da mecânica quântica a todos os sistemas dinâmicos.⁹⁰

Schweber, Bether e Hoffmann também afirmaram:

Uma profunda razão pela qual é preciso quantizar o campo eletromagnético é o fato de que se os parâmetros mecânicos (coordenadas e momenta) das partículas devem ser quantizados, então os campos acoplados a elas precisam ser também quantizados. Isso [ocorre] porque o princípio da incerteza de Heisenberg não pode ser válido somente para parte da natureza. Se o princípio da incerteza não for aplicado também aos campos, Bohr e Rosenfeld mostraram que seria possível construir um experimento de pensamento que, em princípio, permitiria uma medição simultânea acurada da posição e do momento da partícula por meio de uma análise dos campos por ela gerados. Por isso, a quantização do campo eletromagnético é uma consequência inevitável da quantização da dinâmica da partícula.⁹¹

Ernst Henley e Walter Thirring fizeram uma afirmação bastante similar.

A aplicação destas regras [de comutação] a campos cria a teoria quântica dos campos. A teoria quântica elementar⁹² não é uma teoria consistente quando combinada com a teoria clássica de campos. Foi observado por Bohr e Rosenfeld que inconsistências aparecem a não ser que a teoria clássica do campo eletromagnético seja quantizada. Caso isto não seja feito, seria possível, então, violar a relação de incerteza entre a posição e o momento [linear] de uma partícula (por exemplo, um elétron).⁹³

⁹⁰Schwinger, Julian (ed). **Selected Papers on Quantum Electrodynamics**. New York: Dover, 1958, p. viii.

⁹¹Schweber, Silvan S. *et alii*. **Mesons and Fields**: Volume I Fields. Evanston: Row, Peterson, 1955, citação p. 90.

⁹²Eles empregam aqui a palavra “elementar” como sendo sinônimo de “as bases da teoria”, o que hoje poderíamos chamar de “os fundamentos da teoria”. Ou seja, mecânica quântica elementar designa a parte da mecânica quântica voltada à construção da mesma, os seus primeiros passos sob o ponto de vista lógico.

⁹³Henley, Ernest & Thirring, Walter. **Elementary quantum field theory**. New York: McGraw-Hill, 1962.

Entretanto, não havia, no artigo de 1933, nenhuma reivindicação acerca da necessidade de quantização e, no início da década de 1960, Rosenfeld reagiu enfaticamente contra esta ideia.⁹⁴ Em uma série de três respostas, ele advogou que a quantização somente pode ser decidida com base em evidências empíricas, nunca com base em argumentos de medição.⁹⁵ As opiniões de Rosenfeld serão discutidas em detalhes no próximo capítulo.

Alguns autores foram mais cuidadosos no tratamento do assunto. Jauch e Rohrlich, por exemplo, antes de escreverem um livro texto sobre teoria quântica de campos, escreveram a Rosenfeld perguntando muitas questões sobre o artigo de 1933.⁹⁶

A medição de campos quânticos teve também um considerável impacto na pesquisa sobre a quantização da gravitação. Tullio Regge, um aluno de doutorado italiano em Rochester, escreveu, em 1956, uma breve nota analisando a medição do campo gravitacional.⁹⁷ Em 1954, Helmut Salecker, um físico alemão, foi para Princeton como assistente de pesquisa de Eugene Wigner. Juntos, eles tentaram desenvolver um experimento de pensamento que tinha o propósito de medir o campo gravitacional em uma escala microscópica. Com esse propósito, eles inventaram, sob inspiração de Bohr e Rosenfeld, um “relógio conceitual” (conceptual clock) para medir distâncias espaço-temporais microscópicas. O resultado por eles obtido, ainda que interessante, não teve muito impacto. Wigner era bastante cético acerca das medições de campos quânticos, dado o grande número de idealizações que impossibilitava a medição de ser realizada como experimentos reais, construídos em um laboratório.⁹⁸

⁹⁴Cf. Rosenfeld, Léon. **On quantization of fields**. Nuclear Physics, v. 40, pp. 353-356, 1963; Rosenfeld, Léon. **Quantentheorie und gravitation**. In: J. Treder (ed). Einstein-Symposium: Entstehung, Entwicklung und Perspektiven der Einsteinschen Gravitationstheorie. Berlin: Akademie-Verlag, 1966 (consultamos a tradução para o inglês **Quantum Theory and Gravitation**. SPLR, pp. 599-608); Infeld, Leopold (ed). **Relativistic Theories of Gravitation**. Warsaw: Pergamon Press, 1964, pp. 144-145 e pp. 219-222. Cf. também **carta de Rosenfeld para Herman Bondi**, 07.11.1961. RP, 8-11-6 (General relativity and gravitation).

⁹⁵Rosenfeld estava correto em suas afirmações acerca da medição, entretanto, sob o ponto de vista formal, a sua oposição à quantização dificilmente seria justificável. Para uma análise crítica de Rosenfeld, cf. Kalckar. **Measurability problems in the quantum theory of fields**, *op. cit.*

⁹⁶**Carta de Jauch para Rosenfeld**, 26.02.1953. RP, 7-4-3 (Correspondence diverse, 1947-1958). Jauch, Josef-Maria & Rohrlich, Fritz. **The Theory of Photons and Electrons**. Reading: Addison-Wesley, 1955, pp. 78-81. Esse livro talvez seja o texto didático mais fiel às intenções originais de Bohr e Rosenfeld.

⁹⁷Regge, Tullio. **On the Measurability of Gravitational Field Strengths in Quantum Mechanics**. WP, VI-115.

⁹⁸Salecker, Helmut. **Conceptual Clock Models**. In: C. DeWitt-Morette & D. Rickles. The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference. Berlin: Edition Open Access, 2011, pp. 171-185; e também

A análise da medição explicita os comutadores da teoria

O uso mais sofisticado das ideias de medição durante esse período foi feito por Bryce DeWitt. Ele estava interessado no artigo de 1933 desde 1952, quando, durante uma estada no Tata Institute, na Índia, ele o traduziu para o inglês.⁹⁹ Alguns anos mais tarde, quando já tinha se tornado um dos mais importantes pesquisadores em gravitação, DeWitt ficou sabendo do projeto de Wigner e Salecker, e decidiu se juntar à empreitada. Primeiro, ele sugeriu esse problema a um de seus alunos de doutorado, Hsing Yang Yeh.¹⁰⁰

DeWitt, entretanto, estava tão interessado em medições de campos que decidiu atacar o problema ele próprio. Uma vez que não havia ainda, naquela época, nenhuma teoria quântica do campo gravitacional, ele decidiu tentar desenvolver a teoria a partir das análises de medição. DeWitt sabia que estava virando os argumentos de Bohr e Rosenfeld de cabeça para baixo.

A [nossa] dívida para com [o artigo de Bohr e Rosenfeld] pode parecer surpreendente em um certo sentido, não, sem dúvida, devido a qualquer diminuição de importância hoje em dia desse clássico trabalho, mas porque o seu conteúdo, conforme Bohr e Rosenfeld repetidamente apontaram, foi guiado de todos os sentidos pela existência de um formalismo já desenvolvido, ao passo que aqui nós estamos tentando “colocar o carroça na frente dos bois” – desenvolver o próprio formalismo com a ajuda das ideias da teoria da medição.¹⁰¹

Em vez de comparar as incertezas obtidas a partir de experimentos de pensamento e aquelas obtidas a partir do formalismo matemático, DeWitt usou o primeiro para definir o segundo, obtendo assim os comutadores da teoria quântica do campo gravitacional. O esquema lógico

Salecker, Helmut & Wigner, Eugene. **Quantum Limitations of the Measurement of Space-Time Distances**. Physical Review, v. 109, n. 2, pp. 571-577, 1958. Cf. também Wigner, Eugene. **Concept of Observation in Quantum Mechanics**. In: F. Werner (ed). Conference on the Foundations of Quantum Mechanics. Xavier University, Cincinnati, 1 a 5 de outubro de 1962.

⁹⁹Entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

¹⁰⁰Yang Yeh, Hsing. **Measurability of Gravitational Field Strengths**. Nuovo Cimento, suplemento al volume XXI, n. 2, series 10, pp. 101-156, 1961.

¹⁰¹DeWitt, Bryce. **The quantization of geometry**. In: L. Witten (ed). Gravitation: an introduction to current research. New York: John Wiley Sons, 1962, pp. 266-381, citação p. 270.

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \dots \implies \Delta A \Delta B \geq \dots$$

$$\Updownarrow \text{ (comparação)}$$

$$\text{medição} \implies \Delta A \Delta B \gtrsim \dots$$

foi substituído pelo novo esquema

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \dots \Longleftarrow \Delta A \Delta B \geq \dots$$

$$\Uparrow \text{ (implicação)}$$

$$\text{medição} \implies \Delta A \Delta B \gtrsim \dots \quad (2.11)$$

Ou seja, a análise de medição explicita as incertezas às quais o sistema está sujeito, as quais são identificadas com as relações de incerteza do formalismo, e por fim usadas para definir os comutadores da teoria. Desde modo, *as medições de campos quânticos foram usadas para desenvolver um formalismo matemático para teorias quânticas ainda desconhecidas, em particular, para a gravitação quântica.*¹⁰²

Filiação e subversão

DeWitt não imaginava estar indo contra Bohr e Rosenfeld. No momento em que seus argumentos estavam completamente desenvolvidos, ele escreveu aos dois, enviando uma cópia do texto e solicitando os seus comentários sobre o mesmo.¹⁰³ É bastante surpreendente que DeWitt e Wheeler, os dois físicos que fizeram os usos mais pragmáticos e instrumentalistas da medição de campos quânticos durante os anos 1950, tenham acreditado que eles estivessem realizando uma extensão

¹⁰²Cf. DeWitt, Bryce. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups**. Journal of Mathematical Physics, v. 2, n. 2, p. 151-162, 1961; DeWitt, Bryce. **Definition of Commutators via the Uncertainty Principle**. Journal of Mathematical Physics, v. 3, n. 4, 1962.

¹⁰³**Carta de DeWitt para Bohr**, 11.01.1961. BSCS, 71. **Carta de DeWitt para Rosenfeld**, 11.01.1961. RP, 8-11-6 (General relativity and gravitation). DeWitt também enviou uma cópia do seu texto para Christian Møller. Para uma análise da oposição de DeWitt à interpretação de Copenhagen após 1967, cf. o cap. 3 desta tese. Cf. também Freire Jr, Olival. **Quantum dissidents: Research on the foundations of quantum theory circa 1970**. SHMP, v. 40, pp. 280-289, em particular p. 287.

completamente aceitável das ideias de 1933. Entretanto, havia poucos pontos em comum entre os seus usos da medição de campos quânticos e as ideias originais de Bohr e Rosenfeld.

Em função desta discordância sobre a medição de campos quânticos, DeWitt rompeu explicitamente com a interpretação de Copenhague em 1967. Esse rompimento será analisado em detalhes no próximo capítulo.

2.4 O que foi feito das ideias de Bohr?

Neste capítulo, analisamos as diversas leituras e os muitos usos das ideias de Bohr acerca da teoria quântica de campos. Tais usos tinham sido, até agora, largamente ignorados na história da física. Podemos, enfim, avaliar de modo mais preciso a recepção dos argumentos de Bohr e Rosenfeld sobre a medição de campos quânticos.

Nós mostramos que artigo de 1933 foi consideravelmente lido desde 1933 até meados dos anos 1960. Logo, o declínio da importância dos argumentos de Bohr e Rosenfeld não ocorreu, tal como alguns autores supuseram, concomitantemente ao declínio, ocorrido nos anos 1940 e 1950, de uma física orientada epistemologicamente. Entretanto, esse declínio da relevância da epistemologia alterou o modo como os físicos abordaram a medição de campos quânticos. Na década de 1930, Bohr, Rosenfeld, Landau, Peierls, Solomon, Fock, Bronstein, Heitler, Nordheim, Teller, Gamow e Mariani utilizaram a medição de campos quânticos com o propósito de refletir acerca da teoria quântica, julgando as suas hipóteses e os seus domínios de aplicabilidade. Nas décadas de 1950 e 1960, diversos físicos, em particular Wheeler e DeWitt, utilizaram a medição de campos quânticos como uma ferramenta teórica, um instrumento para a formulação de novas teorias.

Deste modo, na história que contamos, a postura pragmática, utilitária e instrumentalista que emergiu na física após a Segunda Guerra Mundial não é revelada pelo desaparecimento das discussões acerca do artigo de 1933, mas sim por uma mudança nos modos como esse artigo foi lido e interpretado. A fim de apreendermos aqui a emergência do pragmatismo na física, precisamos atentar aos modos como os argumentos de Bohr e Rosenfeld foram usados por outros físicos. A ciência é feita de usos. Não devemos denominar esses usos “extensões”, pois usos não têm fidelidade a ve-

lhos projetos. Devemos, pois, falar de apropriações.¹⁰⁴ Todo uso é uma apropriação. Todo uso é uma operação que põe o discurso fora do alcance daqueles que o produziram.¹⁰⁵

Este foi o destino dos argumentos de Bohr e Rosenfeld. Alguns jovens físicos usaram as condições de campos quânticos para os seus próprios projetos.¹⁰⁶ O velho vocabulário e as velhas

¹⁰⁴A palavra “apropriação” foi utilizada uma única vez no contexto da história da medição de campos quânticos, a saber, por Anja Jacobsen. Seu artigo de 2011 é intitulado “Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics: The failed appropriation of epistemology in the second quantum generation”. Curiosamente, ela utilizou a palavra somente no título de seu trabalho, sem repeti-la nenhuma vez no decorrer do texto.

Ao falar de “apropriação falha”, Jacobsen coloca a questão em termos normativos. Segundo ela – conforme citamos na seção 2.1 – os físicos da segunda geração quântica “ou tinham dificuldade em compreender as sutilezas das reflexões críticas da geração mais velha, ou eram por demasiado impacientes para se preocupar com elas”. Ou seja, os jovens físicos, segundo ela, não entenderam Bohr, não se preocuparam com Bohr e não se interessaram pelas suas ideias, as quais eram muito epistemológicas para eles. Aqui, neste trabalho, optamos por uma outra abordagem, diferente daquela de Jacobsen. Buscamos entender: quais modos de organização de mundo tinham esses físicos mais jovens? Quais eram os seus objetivos? Por que eles estavam lendo os textos de Niels Bohr? É em função deles que colocamos as questões.

Optamos por essa escolha ao compararmos a nossa situação historiográfica com um clássico da historiografia política brasileira. José Murilo de Carvalho, ao analisar o posicionamento político da população carioca, escreveu: “Ainda hoje [1987], tempo de Nova República, livre da tarefa de representar o país e tendo conquistado o direito de eleger seus governantes, a cidade não consegue transformar sua capacidade de participação comunitária em capacidade de participação cívica. A atitude popular perante o poder ainda oscila entre a indiferença, o pragmatismo fisiológico e a reação violenta. O conluio da ordem com a desordem, da lei com a transgressão, outrora tipificado no uso de capoeiras nas eleições, continua em plena vigência através do acordo tácito entre autoridades e banqueiros do jogo do bicho. A Cidade, a República e a Cidadania continuam dissociadas, quando muito perversamente entrelaçadas. O esforço de associá-las segundo o modelo ocidental tem-se revelado tarefa de Sísifo. Já é tempo talvez de se fazer a pergunta se o caminho para a cidadania não deve ser outro. Se a República não republicanizou a cidade, cabe perguntar se não seria o momento de a cidade redefinir a República segundo o modelo participativo que lhe é próprio, gerando um novo cidadão mais próximo do cidadão.” **Os bestializados:** o Rio de Janeiro e a República que não foi. Rio de Janeiro: Companhia das Letras, 1987, p. 164.

Dadas, obviamente, as devidas diferenças, nos perguntamos aqui se o fato das atitudes dos jovens físicos perante a epistemologia oscilarem entre a indiferença (como nos casos da maioria dos físicos), o pragmatismo fisiológico (como nos casos de Wheeler e Bronstein) e a reação violenta (como no caso de DeWitt) não estaria nos indicando que, ao invés de impormos a eles um modo de organização do conhecimento, nós devêssemos nos perguntar se não seria o momento desses físicos redefinirem a física segundo os modelos que lhe são próprios, gerando, em nossa compreensão histórica, um físico mais próximo do que esses físicos queriam ser.

Nesta perspectiva, dizer que os jovens físicos não compreenderam Bohr ou dizer que eles *falharam ao se apropriar da epistemologia*, seria algo tão absurdo quanto a fala de Louis Couty, um francês residente no Brasil que, em 1881, proferiu a famosa frase “O Brasil não tem povo!”. Ou seja, seria julgar uma comunidade com modos de organização normatizados que lhe são externos. Seria julgar os físicos com o olhar de um estrangeiro. Ao analisarmos os jovens físicos com esse olhar, não há nada mais natural que eles parecerem bestializados diante da epistemologia.

¹⁰⁵Cf. Foucault, Michel. **Qu’est-ce qu’un auteur?** (1969). In: M. Foucault. *Dits et Ecrits*, v. 1. Paris: Gallimard, 1994, pp. 789-821, em particular p. 810.

¹⁰⁶A legitimidade desses usos é posta de modo muito interessante por Foucault: “As pessoas que eu gosto, eu as utilizo. A única marca de reconhecimento que podemos oferecer a um pensamento [de um grande autor] é precisamente utilizá-lo, deformá-lo, torcê-lo, fazê-lo gritar. Se, então, os comentaristas dizem que fomos, ou não, fiéis [ao autor], isso não tem nenhuma relevância.” Foucault, Michel. **Entretien sur la prison:** le livre et sa méthode (1975). In: M. Foucault. *Dits et Ecrits*, v. 2. Paris: Gallimard, 1994, pp. 740-753, citação p. 753.

referências bibliográficas permaneceram inalterados; e os argumentos originais perseveraram, mas com diferentes propósitos, com diferentes significados.¹⁰⁷ Uma mudança inaudita ocorreu.¹⁰⁸ O descontentamento de Rosenfeld em defesa das intenções originais de Bohr – ainda que compreensível e em larga medida correto sob o ponto de vista da física teórica – ignorou que esta é a destinação de toda teoria: ser tomada daqueles que a fizeram. Esta foi a dinâmica histórica que tentamos apreender aqui.

¹⁰⁷Cf. Certeau, Michel de. **L'invention du quotidien**, v. 1 (Arts de faire). Paris: Gallimard, 1990, p. xxxviii, p. 58 e pp. 147-150. Cf. também Koselleck, Reinhart. **Future Past: On the Semantics of Historical Time**. New York: Columbia University Press, 2004, em particular pp. 89-90. Ver também Certeau, Michel de. **L'écriture de l'histoire**. Paris: Gallimard, 1975, p. 191-197; Kaiser, David. **Stick-Figure Realism: Conventions, Reification, and the Persistence of Feynman Diagrams, 1948-1964**. Representations, v. 70, pp. 49-86, 2000, em particular p. 52.

¹⁰⁸Conforme disse Albert Einstein, em uma citação que já mencionamos, a fim de entendermos os métodos dos cientistas, nós devemos “não ouvir as suas palavras, mas sim prestar atenção nas suas ações”. Einstein *apud* Dongen, Jeroen van. **Einstein's Unification**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, p. 9.

Capítulo 3

O argumento virado ponta-cabeça

A ironia deste capítulo não passará despercebida para alguns leitores.

Bryce DeWitt¹

3.1 O estabelecimento do dissenso

Durante quase quarenta anos, a interpretação de Copenhague foi considerada, por quase a totalidade dos físicos, como sendo a última palavra acerca da interpretação da teoria quântica.² Este consenso teve um fim por volta de 1970. A partir do início dos anos setenta, constatamos o estabelecimento do dissenso. A interpretação da mecânica quântica voltou a ser um problema em aberto e, com isso, toda uma área de pesquisa da comunidade de física se organizou em torno desta temática.

Este movimento não foi, é claro, abrupto. Nas décadas de 1950 e 1960, diversos físicos tinham discutido questões relativas à interpretação da teoria quântica. Muitos deles eram físicos já renomados quando resolveram escrever sobre este tema, pertenciam a quadros de excelentes universidades e suas análises foram publicadas em importantes revistas.³ Apesar disto, estes trabalhos

¹DeWitt, Bryce. **The Global Approach to Quantum Field Theory**. New York: Oxford Univ. Press, 2003, p. 144.

²A denominação “interpretação de Copenhague” foi criada por Werner Heisenberg em 1955. Cf. Howard, Don. **Who Invented the Copenhagen Interpretation?** A Study in Mythology. *Philosophy of Science*, v. 71, pp. 669-682, 2004.

³Entre eles, os mais renomados eram Eugene Wigner (professor na Universidade de Princeton, Nobel em física em 1963), John Wheeler (também professor em Princeton), Léon Rosenfeld (professor na Universidade de Manchester e

dos anos 1950 e 1960 não foram o suficiente para operar uma abertura da comunidade de física a esta temática. Somente na década de 1970 a quantidade de debates sobre o tema cresceu significativamente e, o que é ainda mais notável, a legitimidade desta temática foi definitivamente estabelecida. Tornou-se possível, então, não somente publicar artigos sobre questões interpretativas da teoria quântica, mas também promover cursos, editar volumes e orientar alunos de doutorado sobre o tema.⁴

Muitos foram os fatores que levaram a esta mudança por volta de 1970 e muitas são as dimensões nas quais ela ocorreu. As evidências históricas indicam que os experimentos, ou mais precisamente a expectativa de futuros experimentos, tiveram um certo peso, porém muito pequeno. Também não houve qualquer grande novidade teórica. Isto posto, parece-nos que a mudança se deu mais no nível das instituições e de suas legitimidades.

Diversos foram os acontecimentos de caráter institucional ocorridos neste ano. Em março de 1970, foi criada a revista *Foundations of Physics*, voltada a debates de todas as áreas da física, mas que na prática viria a enfocar sobretudo os debates sobre a interpretação da teoria quântica. Em junho do mesmo ano, a renomada *Scuola Internazionale di Fisica 'Enrico Fermi'*, realizada todos os verões em Varenna, na Itália, sob os auspícios da Sociedade Italiana de Física, teve como tema

editor da importante revista *Nuclear Physics*) e Joseph-Maria Jauch (professor e ex-diretor do Instituto de Física Teórica da Universidade de Genebra). David Bohm e Hugh Everett, quando escreveram seus artigos sobre a interpretação da teoria quântica, também estavam em Princeton, respectivamente como professor assistente e aluno de doutorado.

Todos os trabalhos dos anos 1950 e 1960 foram de cunho estritamente teórico. Os primeiros trabalhos experimentais começaram a surgir já em 1969, mas somente em meados da década de 1970 passaram a receber grande atenção por parte da comunidade de física. Cf. Freire Jr, Olival. **Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982)**. SHMP, v. 37, n. 4, pp. 577–616, 2006, em particular pp. 588–592.

⁴Dois casos de alunos que dedicaram suas teses à questão da interpretação da teoria quântica durante a década de 1950 são bem documentados, a saber, os de Hugh Everett e de Jean-Pierre Vigiér. As dificuldades por eles encontradas são bastante indicativas deste fechamento da comunidade científica a esta temática. Cf. Osnaghi, Stefano *et alii*. **The origin of the Everettian heresy**. SHMP, v. 40, pp. 97–123, 2009.

Para uma análise desta mudança em torno de 1970, cf. Freire Jr, Olival. **Quantum dissidents: Research on the foundations of quantum theory circa 1970**. SHMP, v. 40, pp. 280–289, 2009. Freire Jr, Olival. **The historical roots of 'foundations of quantum physics' as a field of research (1950–1970)**. *Foundations of Physics*, v. 34, n. 11, pp. 1741–1760, 2004. Freire Jr, Olival. **A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950–1970**. *Science & Education*, v. 12, n. 5–6, pp. 573–586, 2003. Freire Jr, Olival. **Orthodoxies on the Interpretation of Quantum Theory: The Case of the Consistent History Approach**. In: S. Katzir, C. Lehner & J. Renn (ed). *Traditions and Transformations in the History of Quantum Physics*. Edition Open Access, 2013, pp. 293–307, em particular p. 295. Para análises quantitativas, cf. Freitas, Fábio & Freire Jr, Olival. **Sobre o uso da Web of Science como fonte para a história da ciência**. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 1, n. 2, pp. 129–147, 2003. Kaiser, David. **Comments on "Interpreting quantum mechanics: a century of debate"**. HSS Session, Novembro de 2007, não publicado.

os fundamentos da mecânica quântica. Este tema não tinha, até então, sido abordado em nenhuma das escolas de verão existentes na Europa. Em novembro, também de 1970, um artigo sobre interpretação da teoria quântica foi estampado nas páginas da renomada revista *Physics Today*, aquela que era a mais importante publicação de divulgação científica voltada para a comunidade de físicos. Estes três acontecimentos foram fundamentais para operar uma reabertura da comunidade científica à questão da interpretação da teoria quântica.⁵

A reviravolta de 1970 foi orquestrada por diversos físicos, tendo sido protagonizada pelo francês Bernard d’Espagnat, pelo italiano Franco Selleri e pelo norte-americano Bryce DeWitt. Se a “monocracia de Copenhague” caiu por volta de 1970, isto ocorreu sobretudo por ação destes três físicos. Este capítulo enfocará a história da relação de DeWitt com a interpretação de Copenhague.

3.2 DeWitt contra a interpretação de Copenhague

O papel de DeWitt no estabelecimento do dissenso foi muito relevante. Foi ele quem convenceu Hobart Ellis and Harold Davies, então editores da *Physics Today*, a abrir as páginas da revista aos debates sobre a interpretação da teoria quântica.⁶ O primeiro passo neste sentido foi dado com a publicação de um artigo, de autoria do próprio DeWitt, apresentando uma explicação didática da interpretação de Everett da teoria quântica, uma das vertentes interpretativas da teoria quântica alternativas à interpretação de Copenhague.⁷ Este artigo suscitou uma série de cartas enviadas por

⁵As notas de aula da escola de Varenna de 1970 foram publicadas em d’Espagnat, Bernard (ed). **Fondamenti di meccanica quantistica**: Rendiconti della scuola internazionale di fisica Enrico Fermi. New York: Academic Press, 1971. Sobre esta escola, cf. Freire Jr, Olival. **Ciência e política na Itália dos anos 1970**. In: O. Freire Jr & S. Carneiro (ed). *Ciência, filosofia e política: uma homenagem a Fernando Bunchaft*. Salvador: EDUFBA, 2013, pp. 107-122.

As quatro principais escolas de verão européias da época eram a École de Physique des Houches, organizada por Cécile Morette em Les Houches, na França, a partir de 1951; a já mencionada Scuola Internazionale di Fisica ‘Enrico Fermi’, organizada pela Società Italiana di Fisica em Varenna, na Itália, a partir de 1953; a CERN School of Physics, organizada pelo Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) em St. Cergue, na Suíça, a partir de 1962; e a International School of Subnuclear Physics, organizada pela Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture em Erice, na Itália, desde 1963. Numa Europa recém destruída pela guerra, as escolas de verão tiveram o papel fundamental de auxiliar na constituição e consolidação da pesquisa em física quântica, sobretudo em países como a França e a Itália, onde a teoria quântica tinha ainda pouca entrada nas universidades. Cf. Vila Valls, Adrien. **Louis de Broglie et la Diffusion de la Mécanique Quantique en France (1925-1960)**. Thèse de Doctorat en Histoire, Philosophie et Didactique des Sciences, Université Lyon I, Lyon, França, Novembro 2012.

⁶Cf. Freire. **Quantum dissidents**, *op. cit.*, p. 287.

⁷DeWitt, Bryce. **Quantum mechanics and reality**. *Physics Today*, v. 23, n. 9, pp. 30-35, 1970.

leitores, que foram publicadas em dois volumes da revista, ambos publicados em 1971.⁸ DeWitt também lecionou um curso em Varenna.⁹ Por volta de 1970, R. Neill Graham, um aluno de doutorado de DeWitt, começou a trabalhar sobre a interpretação de Everett. Juntos, DeWitt e Graham publicaram um artigo de revisão da literatura sobre as diversas interpretações da teoria quântica, publicado no *American Journal of Physics* em 1971, e editaram um livro com os principais documentos da interpretação de Everett, incluindo a primeira versão da tese de Everett,¹⁰ até então inédita, em função das duras críticas que recebera em meados dos anos 1950.¹¹ Esta veiculação maciça de informações acerca da interpretação de Everett foi muito efetiva.¹²

DeWitt não era um especialista em interpretações da teoria quântica, mas sim um estudioso de relatividade geral, em particular da quantização da interação gravitacional, tema ao qual dedicou toda a sua vida. Esta área de pesquisa, dita gravitação quântica, foi estabelecida por ele e por outros físicos nos anos 1950. Lee Smolin, um dos mais proeminentes pesquisadores em gravitação quântica atualmente, afirmou que DeWitt “é justamente considerado o pai da pesquisa séria em gravitação quântica”.¹³ Gerard 't Hooft, prêmio Nobel de Física em 1999, disse que DeWitt era “um gigante da física matemática”.¹⁴ Chris Isham, hoje professor emérito do Imperial College London, afirmou que “o conjunto da obra [de DeWitt sobre gravitação quântica] inclui alguns dos

⁸A primeira série de cartas, mais longas e em geral de autores que tinham alguma tradição de reflexão sobre o tema, foi publicada em **Quantum-mechanics debate: not everyone agrees with Bryce DeWitt that acceptance of quantum theory implies belief in a continually splitting universe**. *Physics Today*, v. 34, n. 4, pp. 36-44, 1971. Os físicos que assinaram estas cartas são: Leslie E. Ballentine, Philip Pearle, Evan Harris Walker, Mendel Sachs, Toyoki Koga, Joseph Gerver. Os textos destes autores foram seguidos de uma resposta do próprio DeWitt. A segunda série de cartas, menores que as anteriores, foi publicada em **Still more quantum mechanics**. *Physics Today*, v. 24, n. 10, pp. 11-15, 1971. Os autores destas cartas são: George L. Trigg, M. Hammerton, R. Hobart Ellis Jr, Robert Goldston e Helmut Schmidt. Com a exceção de Schmidt, nenhum deles tinha publicado anteriormente sobre a interpretação da teoria quântica.

⁹DeWitt, Bryce. **The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics**. In: d'Espagnat. *Fondamenti di meccanica quantistica*, *op. cit.*, pp. 211-262. Reimpresso em DeWitt, Bryce & Graham, R. Neill (ed). **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**. Princeton: Princeton University Press, 1973, pp. 167-218.

¹⁰DeWitt, Bryce & Graham, R. Neill. **Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics**. *American Journal of Physics*, v. 39, n. 7, pp. 724-738, 1971. DeWitt & Graham. **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**, *op. cit.*

¹¹Cf. Osnaghi *et alii*. **The origin of the Everettian heresy**, *op. cit.*, em particular pp. 110-119.

¹²Cf. Freire. **Quantum dissidents**, *op. cit.*, p. 287.

¹³Smolin, Lee. **Three roads to quantum gravity**. New York: Science Masters, 2002, citação p. 119.

¹⁴'t Hooft, Gerard. **The Pursuit of Quantum Gravity: Memoirs of Bryce DeWitt from 1946 to 2004**, by Cécile DeWitt-Morette [book review]. *Foundations of Physics*, v. 42, n. 5, pp. 685-687, 2012, citação p. 685.

mais importantes desenvolvimentos nesta fascinante, mas muito difícil, área de pesquisa da física teórica”.¹⁵ George Ellis e Hermann Nicolai, editores da importante revista *General Relativity and Gravitation*, denominaram DeWitt “um dos grandes pioneiros da gravitação quântica”.¹⁶

Ao final de sua vida, sua obra foi reconhecida com todos os prêmios possíveis, com a única exceção do Nobel. Ele recebeu a Medalha Dirac do Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics em 1987, o Marcel Grossmann Award (conjuntamente com a sua esposa, Cécile DeWitt-Morette) em 2000, o Prêmio Pomeranchuk do Instituto de Física Teórica e Experimental de Moscou em 2002 e o Prêmio Einstein (póstumo) da American Physical Society em 2005.¹⁷ Em 1990, foi eleito membro da National Academy of Science dos Estados Unidos.

É muito provável que tenha sido exatamente devido à sua brilhante carreira como pesquisador numa área bem estabelecida da física, carreira esta que já despontava claramente em 1970, que o seu ataque à interpretação de Copenhague tenha surtido tanto efeito. Nenhum dos opositores desta interpretação — à exceção de Wigner, Wheeler e Bell — tinha, na época, uma carreira tão sólida em física. Ademais, a sua defesa da interpretação de Everett não foi feita *de per se*, como uma discussão restrita à questão da interpretação da teoria quântica, tal qual ocorrera no caso de Wigner, mas sim contextualizada em uma sólida discussão de física teórica. Segundo DeWitt, a interpretação de Copenhague seria incapaz de dar conta da questão da interpretação da gravitação quântica. Este tipo de argumentação, feita completamente em função da física e não da interpretação, era bastante convincente para a comunidade de físicos.

A sua oposição à interpretação de Copenhague foi marcada por um discurso zombeteiro. Em um manuscrito, provavelmente do final de 1966, DeWitt já se referia a ela, de modo intencionalmente malicioso, como “a rígida doutrina de Copenhague”.¹⁸ Em 1970, a fim de desqualificar os

¹⁵ Isham, Chris J. **The contributions of Bryce DeWitt to quantum gravity**. In: S. M. Christensen (ed). *Quantum Theory of Gravity: essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. DeWitt*. Bristol: Adam Hilger, 1984, pp. 22-41, citação p. 21

¹⁶ Cf. DeWitt, Bryce. **Quantum Gravity: Yesterday and Today**. *General Relativity and Gravitation*, v. 41, n. 2, pp. 413-419, em particular p. 413. Este artigo foi publicado postumamente.

¹⁷ Cf. Deutsch, David *et alii*. **Bryce Seligman DeWitt** (obituário). *Physics Today*, v. 58, n. 3, p. 84, 2005.

¹⁸ DeWitt, Bryce. **The quantum theory of gravity I: The canonical theory**. Versão preliminar de um artigo publicado no PREV (ver seção 3.11 do presente capítulo). DF, box Letters, folder “1961-1977: Correspondence Wheeler”.

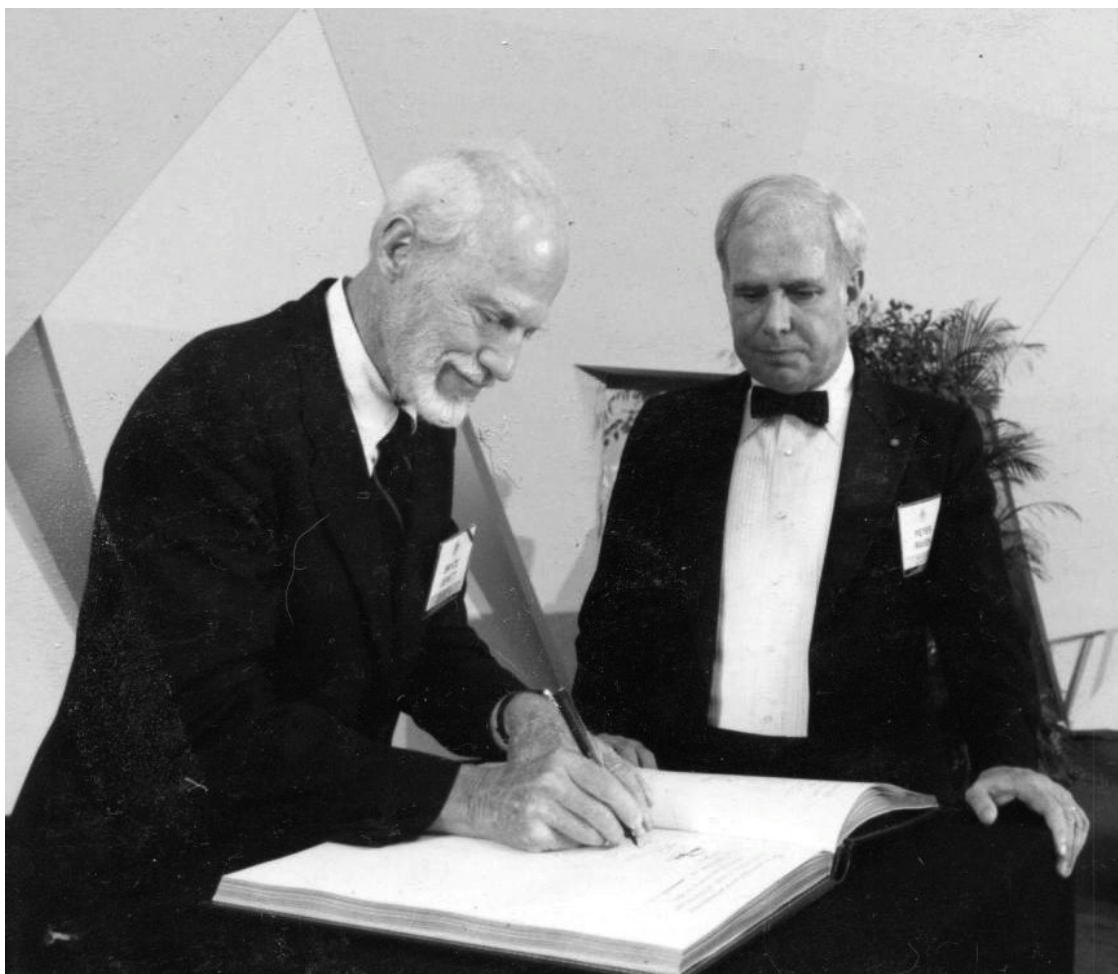


Figura 3.1: Posse de DeWitt como membro da National Academy of Science, 1990. DF, fotos.

defensores desta interpretação, ele chamou-os de “ativistas”, numa conotação claramente política. No mesmo texto, disse que a maioria dos físicos aceitava a interpretação de Copenhagen do mesmo modo que os norte-americanos aceitavam a *United States Bill of Rights*, ou seja, sem lê-la.¹⁹ Na década de 1970, ele e sua esposa jocosamente afirmavam que valia, para Rosenfeld, o dito “Hors Bohr, point de salut!”, em alusão aos ortodoxos religiosos medievais que diziam “Hors de l’Église, point de salut!”.²⁰ Dewitt, em uma carta a John Wheeler, sabendo da profunda admiração de Wheeler por Bohr, ponderou que “é um erro transformar as lições maravilhosas que Bohr

¹⁹DeWitt. **Quantum mechanics and reality**, *op. cit.*, em particular p. 32. Vale observar que este comentário de DeWitt, ainda que debochado, é bastante preciso.

²⁰Ou seja, “Fora da Igreja, não há salvação!”. Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos. Cf. também DM, R, folha avulsa, aparentemente de rascunho, anotada na margem.

nos ensinou em dogmas”²¹ Ao final de sua vida, ao ser perguntado se a perspectiva de Bohr era obscura, ele respondeu: “Ela não é clara, ela está infectada por este misticismo dinamarquês” e complementou, “eu acho que ele [Bohr] fez uma lavagem cerebral com uma geração de físicos”.²²

Considerando a ênfase com que DeWitt se opôs à ortodoxia vigente, a profunda ironia de seus comentários e a grande quantidade de frentes de batalha por ele abertas, se coloca diante de nós o importante trabalho histórico de compreendermos este posicionamento. Como e quando DeWitt passou a defender a interpretação de Everett? Por que ele o fez? Como compreender historicamente esta adesão? Como ela se insere em um panorama mais amplo de autoridade de Copenhague? Como se dá este jogo de leitura, admiração, extensão, apropriação, rompimento? Estas são as questões históricas que queremos responder neste capítulo.

3.3 A narrativa estabelecida

Dada a importância de DeWitt, é de se esperar que outras pessoas já tenham escrito sobre a história de sua adoção da interpretação de Everett. Em particular, é de se esperar que as questões históricas acima já tenham sido formuladas e respondidas por outros historiadores.

De fato, já existe na literatura uma versão estabelecida do como e quando DeWitt se aproximou da interpretação de Everett. Esta versão é fruto de inúmeras entrevistas dadas por DeWitt, de algumas reminiscências de seus colegas e do trabalho do jornalista Peter Byrne sobre a história da interpretação de Everett. Recentemente, a narrativa padrão foi reiterada em um livro póstumo de reminiscências de DeWitt organizado por sua mulher Cécile DeWitt-Morette.

O nosso propósito, neste capítulo, é apresentar uma outra narrativa, a qual é, em muitos sentidos, ortogonal à narrativa estabelecida. Ou seja, o presente capítulo é, *de facto*, uma crítica desta narrativa. No decorrer deste capítulo, nos referiremos por diversas vezes à narrativa estabelecida, a fim de explicitar em quais pontos nos distanciamos dela. Esperamos que estes comentários te-

²¹Carta de DeWitt a Wheeler, 24.09.1979. Cópia digitalizada disponível em EM, 1181. Neste repositório, consta que a carta original estaria no WP, entretanto nós não a encontramos neste último arquivo.

²²Bryce DeWitt em entrevista a Lars Becker-Larsen, 10.04.2003. Transcrição gentilmente cedida pelo entrevistador.

nam valia para o leitor que não é especialista em história das interpretações da teoria quântica e que talvez não fosse capaz de perceber, sem o auxílio de tais comentários, a dimensão crítica do presente texto.

Vale fazermos, preliminarmente, algumas observações.

A narrativa estabelecida afirma que teria havido dois momentos importantes na história da adoção da interpretação de Everett por DeWitt. O primeiro teria ocorrido em 1957, quando DeWitt foi apresentado à interpretação de Everett. Segundo a narrativa padrão, DeWitt seria um defensor de Everett desde este instante, ainda que não alardeasse a sua adesão. O segundo momento teria ocorrido em 1967, quando DeWitt, motivado por uma conversa com o historiador Max Jammer, teria resolvido iniciar uma campanha em defesa de Everett.

A enfática defesa de Everett durante décadas, aliada a uma crítica sistemática à interpretação de Copenhague, faz crer que DeWitt tornou-se um adepto da interpretação de Everett desde o primeiro momento. Entretanto, isto não é verdade. DeWitt foi, nos anos 1950 e 1960, bastante próximo da interpretação de Copenhague, conforme mostraremos.

Esta narrativa que criticamos é imprecisa em diversos aspectos e somente serve para obscurer alguns pontos centrais da adoção da interpretação de Everett por DeWitt. O seu principal problema, conforme veremos, está em colocar em segundo plano a pesquisa de DeWitt sobre gravitação quântica, que era a principal preocupação de DeWitt na época. Nós mostraremos no presente texto que foi a partir dela que DeWitt iniciou sua ruptura com Copenhague e se aproximou da interpretação de Everett.

A nossa narrativa começa muito antes de 1957, pois estiveram presentes na infância e na juventude de DeWitt alguns elementos fundamentais para entendermos de modo preciso a história de sua perspectiva acerca da física quântica. Começaremos, portanto, falando do jovem DeWitt.

3.4 O jovem Bryce Seligman DeWitt (1923-1945)

Carl Bryce Seligman nasceu dia 8 de janeiro de 1923 em Dinuba, uma pequena cidade localizada no San Joaquin Valley, uma árida região do vale central do Estado da Califórnia ao sul de Sacramento, nos Estados Unidos.²³

Seu pai, Lewis Lipman Seligman, era o médico da região e sua mãe, Honor Pettit Seligman (nascida Honor Kathleen Pettit), era a professora de latim e matemática da escola local. Carl foi o primeiro de quatro filhos, todos homens. Os seus irmãos mais novos se depararam, em meados da década de 1940, com diversos mal-entendidos devido à origem judia do sobrenome Seligman, o que levou o seu pai a sugerir que eles alterassem os seus nomes. Em 1950, após a morte de Lewis, os filhos levaram adiante o pedido, adicionando, aos seus nomes o sobrenome DeWitt, que vinha de uma longínqua origem da família materna. Surgiu, assim, o nome Bryce Seligman DeWitt.²⁴

Próximo a Dinuba, na região rural, moravam os seus avós maternos, Hiram Pettit e Emma Bryce Pettit. Eles levavam uma vida bastante modesta em uma casa muito pobre. Eles arrendavam um pequeno vinhedo de 80 acres,²⁵ de onde vinham seus poucos proventos. O pequeno Bryce adorava visitar os avós, o que fazia com bastante frequência durante a infância. Ambos eram presbiterianos bastante religiosos. Antes das refeições, eles se ajoelhavam no chão, com os cotovelos apoiados sobre o assento da cadeira de jantar, e o seu avô proferia um longo sermão religioso. Este ritual era repetido após o jantar e era sucedido por uma leitura de dois capítulos da Bíblia do Rei James. Sua avó costumava lhe contar histórias bíblicas e lhe cantava hinos religiosos. Segundo DeWitt, em um relato recente, “O que eu absorvi do protestantismo, eu absorvi dela [minha avó].

²³Em 2012, Dinuba tinha 22.955 habitantes. O censo mais antigo que encontramos da cidade é de 1980, segundo o qual consta que a cidade tinha, na época, 9.907 habitantes. É difícil estimar quantos habitantes havia em 1923, mas podemos crer que fossem somente algumas centenas.

²⁴Weinberg, Steven. **Bryce Seligman DeWitt, 1923-2004**. Biographical Memoir, National Academy of Science, 2008. A recusa do nome judeu rendeu a DeWitt um problema em 1971. Ele estava em negociação para ir lecionar na Universidade de Stanford, na cátedra que antes pertencera a Leonard Schiff, que acabara de falecer, e sua indicação já tinha sido aceita pelos professores do departamento. Porém, ao ficar sabendo da mudança de nome, Felix Bloch, um físico judeu suíço emigrado da Alemanha para os Estados Unidos em 1934 devido à ascensão do nazismo, que era então o mais célebre professor de física de Stanford, retirou-lhe o convite.

²⁵Cerca de 324.000 m², ou seja, algo como 600 por 540 metros.

E eu absorvi de uma forma particularmente evangélica”.²⁶



Figura 3.2: Bryce e seu avô, s/d. DF, fotos.



Figura 3.3: Bryce e sua avó, s/d. DF, fotos.

Seu avô queria ter sido astrônomo e chegou a montar um telescópio. Entretanto, por dificuldades financeiras, não conseguiu ir à universidade. A grande abertura e interesse de seu avô pela ciência gerava discussões entre ele e a sua avó, em particular acerca do darwinismo, que ela se recusava veementemente a aceitar.

Quando DeWitt tinha cerca de 10 anos, seus pais lhe enviaram para a Daily Vacation Bible School, uma espécie de colônia de férias de educação religiosa. Lá, como consequência de ginásticas e competições de memorização de trechos bíblicos, DeWitt teve um contato mais aprofundado com a Bíblia.

²⁶DeWitt, Bryce. **God's Rays**. *Physics Today*, v. 58, n. 1, 2005, pp. 32-34, citação p. 32.

Como resultado [das competições], adquiriríamos, sem maiores esforços, um domínio daquelas grandes linhas da Bíblia, as quais os autores de língua inglesa podiam presumir, até a metade do século XX, como sendo parte da herança cultural européia. Hoje em dia, quando leio romances do século XIX ou do início do século XX, pego-me pensando quantos leitores compreendem as alusões bíblicas. (...) É uma pena termos perdido a habilidade de fazermos uso daquelas grandes linhas, tais como (...) “Os céus declaram a glória de Deus; e o firmamento mostra a obra das suas mãos”, “Mesmo que eu possua toda a fé, de tal maneira que possa remover montanhas, se eu não tiver caridade, eu nada sou”.²⁷

Até os onze anos de idade, Bryce tinha vivido constantemente sob a dupla influência da religiosidade de sua avó e do fascínio pela astronomia de seu avô. Cansada da vida rural, sua mãe resolveu, em 1935, que eles iriam se mudar. Com isso, a família foi morar em Concord, no estado de Massachusetts. Bryce foi matriculado na Middlesex School, onde veio a se tornar um exímio remador, tendo competido na equipe da escola em competições interescolares. O sonho de ser astrônomo permaneceu vivo no jovem Bryce até alguns anos mais tarde, quando ele entrou na *high school* e foi apresentado a outras ciências, tais como a física. O fascínio de Bryce pelas ciências exatas era imenso e ele o nutria lendo avidamente livros de ficção científica.

Em 1939, aos dezesseis anos de idade, Bryce foi aprovado para o ingresso na Universidade de Harvard e no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), tendo escolhido Harvard em função da existência de remo na lista de atividades esportivas. Segundo uma entrevista de sua mãe ao jornal local, DeWitt queria seguir a carreira de engenheiro elétrico. Em meados de 1943, ele acabou por se graduar em física, feito realizado com uma distinção *summa cum laude*. Pouco sabemos dos anos em que DeWitt esteve em Harvard.

Findos os estudos, o brilhante jovem físico foi convidado por Robert Oppenheimer para se juntar a um projeto de pesquisa secreto que era parte do projeto Manhattan. O lugar para o qual ele seria enviado não poderia ser revelado de antemão. Cioso de retornar à Califórnia, DeWitt declinou o convite. Oppenheimer contatou então os responsáveis pelo acelerador Calutron, localizado no *Livermore Radiation Laboratory* da Universidade da Califórnia, em Berkeley.

²⁷ *Ibid.*, citação p. 33. As pequenas diferenças das citações se comparadas ao que para nós seria o normal (tal como o uso de “caridade” no lugar de “amor” em Coríntios 13:2) se devem ao fato de DeWitt citar a Bíblia do Rei James.

O acelerador, que também era parte periférica do projeto Manhattan, tinha a função de fornecer o urânio enriquecido utilizado nas bombas nucleares que estavam em construção. Entretanto o trabalho não correspondia ao que DeWitt esperava. O seu dia-a-dia se limitava a realizar soldas, medir distâncias com metros etc. Ele, então, optou por pedir dispensa do trabalho, a fim de se alistar nas forças armadas. No dia 4 de julho de 1944, DeWitt entrou para a marinha norte-americana. Ele foi enviado para a base aérea de Pensacola, na Flórida, onde obteve a patente *lieutenant junior grade* (LTJG) em aviação da marinha em 1945, com treinamento específico em aeronaves modelo SBN.²⁸ Entretanto, a guerra acabou semanas depois e ele não foi enviado para batalha. Posto na reserva das forças armadas, resolveu voltar para Harvard.²⁹

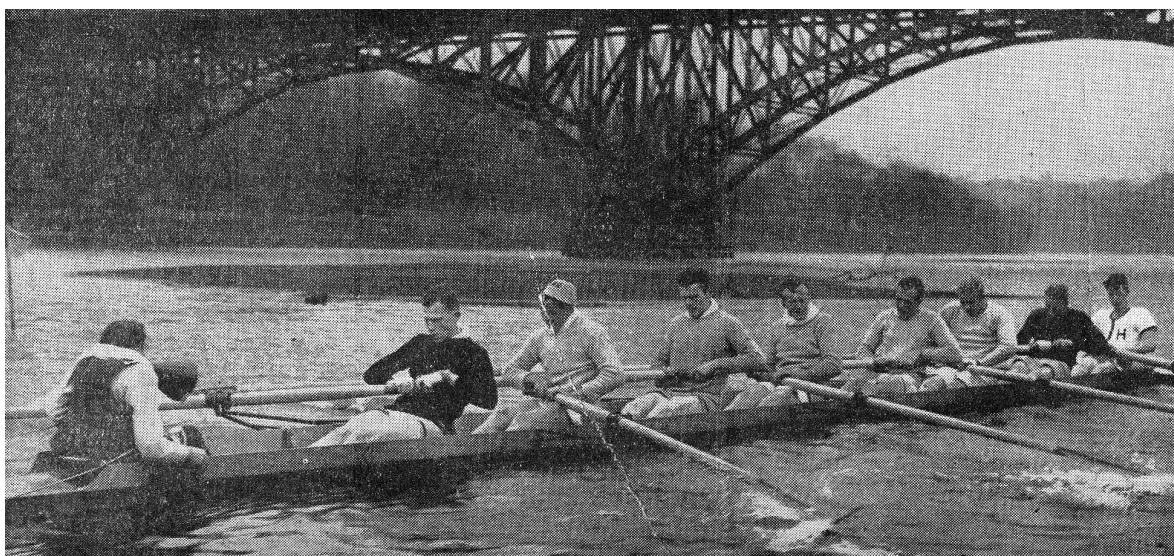


Figura 3.4: Equipe de remo de Harvard. DeWitt é o voga. DF, fotos.

Foto da capa do caderno de esportes do jornal The Evening Bulletin, 30.05.1944.

²⁸Bimotores de transporte de passageiros, com capacidade para dez pessoas, mais dois pilotos.

²⁹Cf. memorial em homenagem a Bryce DeWitt na página da Universidade do Texas em Austin: http://www.ph.utexas.edu/utphysicshistory/UTexas_Physics_History/Bryce_S._DeWitt.html (acessado 10.08.2013).

3.5 A tese de doutorado (1946-1950)

Em janeiro de 1946, DeWitt iniciou o mestrado em física e, em 1947, o doutorado.³⁰ Ele chegou ao doutorado no ano mais importante da física teórica norte-americana de todos os tempos.³¹

No início de junho deste ano, Willis Lamb e Robert Retherford, da Universidade de Columbia, apresentaram na conferência de Shelter Island um resultado experimental intrigante: a ocorrência de uma nova linha espectral no espectro do átomo de hidrogênio.³² No trem, voltando para casa após a conferência, o físico norte-americano Hans Bethe, professor na Universidade de Cornell, conseguiu uma explicação para este resultado experimental. Ele demonstrou que, devido ao acoplamento do átomo de hidrogênio com o campo eletromagnético (no estado de vácuo), haveria uma quebra de degenerescência entre os níveis $2S_{1/2}$ e $2P_{1/2}$ do átomo de hidrogênio, sendo a energia do primeiro subnível um pouco maior que a do segundo. Isso faria com que as frequências de transição $2S_{1/2} \rightarrow 1S$ e $2P_{1/2} \rightarrow 1S$ não fossem mais iguais, havendo, assim, uma nova linha espectral. Os cálculos davam com muita precisão o resultado de Lamb e Retherford.³³ Em sua demonstração, ele desenvolveu uma nova técnica matemática, a qual permitia a absorção de quantidades infinitas nos parâmetros da teoria (no caso, na massa do elétron), técnica esta que veio a ser denominada renormalização.³⁴

A conta de Bethe tinha somente um problema. Na sua renormalização, ele teve que incluir um corte nas integrais divergentes e isso foi feito de modo bastante arbitrário. Em particular, este corte não era invariante por mudanças de coordenadas, ou seja, em termos técnicos, não era covariante. Fazia-se necessário, portanto, elaborar uma formulação matemática covariante da renormalização. Isto foi feito ainda em 1947 por três físicos, de modo completamente independente, a saber, os norte-americanos Julian Schwinger e Richard Feynman, e o japonês Sin-Itiro Tomonaga. Como

³⁰Segundo é narrado, DeWitt chegou em Harvard antes mesmo de sair da marinha, cf. Mehra, Jagdish & Milton, Kimball. **Climbing the Mountain: The Scientific Biography of Julian Schwinger**. Oxford: Oxford University Press, 2000, p. 592.

³¹Para uma história detalhada destes acontecimentos de 1947, cf. SQED, em particular pp. 156-247.

³²Lamb, Willis & Retherford, Robert. **Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method**. PREV, v. 72, pp. 241-243, 1947.

³³Bethe, Hans. **The Electromagnetic Shift of Energy Levels**. PREV, v. 72, pp. 339-341, 1947.

³⁴Para uma lúcida exposição conceitual da renormalização, cf. SQED, pp. 595-605.

observou o físico chinês, naturalizado norte-americano, Chen Ning Yang,

o desenvolvimento da renormalização, tanto teórico quanto experimental, foi a primeira grande excitação na física após a guerra. Também significou o fim do monopólio da física fundamental pela Europa. [Este desenvolvimento] significou o início de uma nova era, a era americana.³⁵

Foi neste contexto que DeWitt começou o seu doutorado. Ele próprio escolheu o tema de sua tese, a teoria da relatividade geral. Desenvolvida por Einstein na década de 1910, esta teoria se encontrava eclipsada pela teoria quântica, a tal ponto que poucos eram os pesquisadores que estudavam-na no final da década de 1940.³⁶ DeWitt se interessou pelo assunto ao ler o livro de Peter Bergmann, um antigo colaborador de Einstein, que era um dos poucos manuais de relatividade geral existentes à época.³⁷ Ele chegou a cursar a disciplina de relatividade geral oferecida em Harvard, entretanto achou a abordagem do professor, Philipp Frank, por demais filosófica.³⁸ O fascínio pela relatividade geral não foi algo nutrido em Harvard, mas uma questão pessoal, possivelmente vinda das conversas com o seu avô sobre o universo e dos livros de ficção científica.³⁹ Ele diz, “eu sempre senti que a relatividade geral era uma teoria extremamente bonita”.⁴⁰

Ao mesmo tempo em que se interessava pela relatividade geral, DeWitt cursou disciplinas com Schwinger, cujas realizações na eletrodinâmica quântica já eram bastante reconhecidas. Foi sob influência destes cursos que DeWitt elaborou a ideia de sua tese de doutorado. Em uma reminiscência, ele, de forma bastante romântica, colocou a situação nos seguintes termos:

³⁵Yang, Chen Ning. **Julian Schwinger**. In: NGJS, pp. 175-180, citação p. 177. Yang ganhou o Nobel em 1957.

³⁶Cf. Eisenstaedt, Jean. **Einstein et la relativité générale**: les chemins de l'espace-temps. Paris: CNRS, 2013.

³⁷O livro é Bergmann, Peter. **Introduction to the Theory of Relativity**. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall, 1942. Sobre este livro, cf. Kaiser, David. **Is a ψ just a ψ ?** *Pedagogy, Practice, and the Reconstitution of General Relativity, 1942–1975*. SHMP, v. 29, n. 3, pp. 321-338, 1998, em particular pp. 324-328.

³⁸Cf. TPQG, pp. 51-52. Sobre Philipp Frank, vale lembrar a fala de Paul Feyerabend: “Philipp Frank era encantador. Ele era vastamente instruído, inteligente, espirituoso, um excelente contador de histórias. Quando tinha a possibilidade de explicar um ponto difícil por meio de uma história (*story*) ou de um argumento analítico, ele invariavelmente escolhia a história.”. Feyerabend, Paul. **Killing Time**: The Autobiography of Paul Feyerabend. Chicago: University of Chicago Press, 1996, p. 103.

³⁹Esta hipótese é compatível com a importância dada à ficção científica em sua juventude, cf. TPQG, p. 2. Gerard 't Hooft chega a jocosamente cogitar que o interesse de DeWitt pela gravitação estaria correlacionado à sua curiosidade em entender como Jesus teria subido aos céus depois de crucificado, cf. 't Hooft. **The Pursuit of Quantum Gravity** [book review], *op. cit.*, p. 685.

⁴⁰Carta de DeWitt para Sam Schweber, 06.12.1988. Reproduzida parcialmente em TPQG, pp. 51-52, citação p. 51.

Eu tinha uma grande sensação de que a teoria da gravidade de Einstein encontrava-se em uma espécie de ostracismo, descolada do resto da física, e de que era vergonhoso que uma teoria tão bela fosse ignorada. Eu decidi dragá-la forçosamente ao mundo moderno por meio de um refazimento das contas de Schwinger para a eletrodinâmica quântica, porém desta vez com o campo gravitacional presente.⁴¹

Ainda que houvesse em seu projeto uma dose de fascínio pela relatividade geral, tal qual ele retrata de forma muito bela na citação acima, havia também uma considerável dose de pragmatismo profissional, a qual ele confessa em uma outra reminiscência.

[Quando aluno, assistindo aos cursos de Schwinger,] um pensamento me ocorreu. Por que eu não vou simplesmente às aulas de eletrodinâmica quântica e, no lugar do campo eletromagnético, coloco o campo gravitacional e tento fazer a mesma coisa que Schwinger estava fazendo[?] Eu pensava que seria levado, passo a passo, pelas próprias notas de aula, de tal modo que seria uma tese bastante fácil [de ser feita].⁴²

O jovem rapaz pensava que o problema seria facilmente abordado. Conforme ele próprio observou décadas mais tarde, “naquela época eu era muito ingênuo.”⁴³ Ele não fazia ideia das dificuldades que encontraria e certamente não poderia antever que este problema – a quantização da gravitação –, que lhe parecia à primeira vista tão simples, viria a se tornar o grande problema da sua vida, para o qual ele contribuiria muito significativamente, com diversos desenvolvimentos muito relevantes, mas nunca conseguiria encontrar uma solução.⁴⁴

Schwinger concordou com o projeto proposto por DeWitt, entretanto fez questão de estabelecer os objetivos da pesquisa. O aluno deveria calcular, de modo explicitamente covariante, a auto-energia gravitacional de um fóton. Esta conta tinha sido feita pelo físico belga Léon Rosenfeld, em 1930, que tinha encontrado um resultado infinito. Schwinger propôs que DeWitt mostrasse que este resultado estava errado e que o valor infinito obtido por Rosenfeld poderia ser absorvido na

⁴¹DeWitt, Bryce. **Preliminary remarks before beginning his technical talk**. In: NGJS, pp. 29-31, citação p. 29-30.

⁴²Carta de DeWitt para Schweber, *op. cit.*, citação p. 51.

⁴³DeWitt. **Preliminary remarks before beginning his technical talk**, *op. cit.*, citação p. 30.

⁴⁴Vale observar que até hoje em dia, no ano de 2013, não há uma solução fechada para este problema.

carga do elétron. Ou seja, cabia a DeWitt mostrar que o problema encontrado por Rosenfeld em 1930 poderia ser resolvido por meio de uma renormalização.

A razão pela qual Schwinger esperava que isto desse certo é bastante significativa do seu modo de pensar. Se o fóton tivesse uma auto-energia gravitacional, ele teria massa e isso geraria um termo de massa na lagrangiana, quebrando a invariância de calibre da teoria. Assim, a fim de preservar a invariância de calibre, a auto-energia do fóton deveria ser nula, o que significava que o resultado de Rosenfeld tinha que estar errado. Schwinger sempre orientava resultados específicos em função de princípios gerais.

DeWitt estudou, então, em detalhes o artigo de Rosenfeld e anotou todas as aulas do curso de teoria quântica de campos de Schwinger. Ele já tinha cursado uma disciplina de eletromagnetismo clássico, em 1946, e conhecia bem o modo como Schwinger lecionava.⁴⁵ As aulas, que tomavam as manhãs, eram rápidas, feitas de cabeça pelo professor, sem consultar nenhum papel, e cabia aos alunos tomar nota de tudo que o professor escrevia no quadro. Depois do almoço, os alunos passavam a tarde tentando desvendar os raciocínios de Schwinger.

Lembro-me eu jogando a caneta na mesa, desgostoso, dizendo “o f.d.p fez isso de novo”. O que eu queria dizer é que ele fez algo soar muito plausível, mas por trás havia muitas questões profundas não respondidas, (...) questões que se você olhasse com cuidado tinham que ser analisadas (...) Era sempre um desafio tentar completar as lacunas nas aulas de Schwinger.⁴⁶

Mesmo estudando cuidadosamente os cursos de Schwinger, a questão de quantizar de modo covariante o campo gravitacional não se mostrou nada fácil. Schwinger era um expositor brilhante, fato que é reconhecido por muitos de seus ex-alunos, inclusive por DeWitt, porém não era um orientador muito presente.⁴⁷ Ele e DeWitt nunca chegaram a ser próximos, do mesmo modo que ele também não era próximo de nenhum de seus alunos.⁴⁸ DeWitt conta que se somadas todas as ve-

⁴⁵DeWitt, Bryce. **Electromagnetic theory of light**, 1946. DP, 4RM189 (“Student notes of Bryce S. DeWitt”).

⁴⁶Entrevista de DeWitt para Schweber, 15.08.1984. Citado em SQED, p. 368.

⁴⁷Para uma coletânea de diversas opiniões de ex-alunos, cf. as reminiscências de diversos de seus alunos em NGJS. Cf. também Mehra & Milton. **Climbing the Mountain**, *op. cit.*, p. 590-605.

⁴⁸Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

zes que os dois conversaram sobre a sua pesquisa, dariam cerca de 20 minutos.⁴⁹ Quando DeWitt comentou sobre suas dificuldades com as contas da tese, tudo que Schwinger disse foi para tirar as fontes das contas, ou seja, retirar dos cálculos os campos espinoriais que descrevem os férmions.⁵⁰ Deste modo, as contas ficaram significativamente mais simples e DeWitt conseguiu alguns resultados modestos, que lhe valeram o título de doutor, mas não eram em nada significativos. “Quando a tese estava concluída, em formato de livro, ela era tanto medíocre como enorme”, disse DeWitt.⁵¹ Ela estava muito aquém dos seus planos iniciais.

A tese, ainda que modesta, deixou suas marcas. De Schwinger, DeWitt herdou o zelo absoluto pela covariância, a qual será um valor teórico fundamental nos seus trabalhos posteriores. Outra herança foi a desconsideração total dos trabalhos de Feynman. As aulas de Schwinger eram feitas de modo inteiramente pessoal, sem referência a nenhum livro-texto e nenhuma menção a outros físicos – a tal ponto que é famosa a situação na qual ele disse, certa vez, que uma determinada equação era “devida a Dirac” e a classe, surpresa, soltou uma exclamação coletiva.⁵² Com isso, Schwinger nunca falava, em particular, de Feynman e de seus trabalhos sobre a eletrodinâmica quântica, e seus alunos eram formados sem qualquer conhecimento de gráficos de Feynman e integrais de caminho. Isto foi considerado por algumas pessoas como sendo um defeito na formação dos alunos de Schwinger, entretanto isto foi, no caso de DeWitt, algo muito positivo.⁵³

⁴⁹Carta de DeWitt para Schweber, 06.12.1988. Reproduzida parcialmente em TPQG, pp. 51-52, em particular p. 52.

⁵⁰Cf. DeWitt. **Preliminary remarks before beginning his technical talk**, *op. cit.*, p. 30. Vale observar que esta alteração ia de encontro à ideia inicial, segundo a qual seria na carga do elétron que seria absorvido o infinito da auto-energia do fóton, pois sem as fontes a carga elétrica não aparece mais nas contas, inviabilizando o projeto inicial.

⁵¹*Ibid.*, citação p. 30. A referência da tese é Seligman, Carl Bryce. **I: The Theory of Gravitational Interactions. II: The Interaction of Gravitation with Light**. Harvard University, PhD Thesis, 1950. Não tivemos acesso à versão da tese defendida em Harvard, mas somente a uma versão ligeiramente elaborada dela, a saber, DeWitt, Bryce Seligman. **On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions**, 1950. DP, box “Articles”, folder “PhD thesis”. Falaremos mais desta última versão na próxima seção.

⁵²Mehra & Milton. **Climbing the Mountain**, *op. cit.*, p. 157.

⁵³Para uma opinião negativa, cf. Gleick, James. **Genius: The Life and Science of Richard Feynman**. New York: Vintage Books, 1993, p. 276. Ele afirma que os alunos de Schwinger encontravam-se em uma situação de “desvantagem” por não conhecerem bem as técnicas de Feynman. Abraham Klein, um ex-aluno de Schwinger, discordou de Gleick, alegando que Schwinger discutia ao seu modo as ideias de Feynman, ainda que sem mencionar o seu nome. Cf. Klein, Abraham. **Recollections of Julian Schwinger**. In: NGJS, pp. 1-7, em particular p. 4. Mehra e Milton, este também um ex-aluno de Schwinger, concordaram com Klein e alegaram que não havia desvantagem, uma vez que Feynman nem sequer alunos tinha. Cf. Mehra & Milton. **Climbing the Mountain**, *op. cit.*, p. 160-161. A citação de DeWitt a seguir também é em resposta a este comentário de Gleick, com o qual DeWitt concorda parcialmente: ele está de acordo com o fato dos alunos não serem expostos às técnicas de Feynman, mas não vê nisso somente uma desvantagem, como também

Obviamente, se tivéssemos técnicas de [cálculo no] espaço de momenta e diagramas prontamente ensinados para nós [alunos] em Harvard [no final dos anos 1940], isso teria nos ajudado imensamente nas contas. Por outro lado, do modo como Schwinger nos apresentava as coisas (...), ele nos ensinava a pensar de modo mais livre de amarras (*more unconstrained way*). É talvez paradoxical, mas as limitações impostas por Schwinger ao não mencionar Feynman e Dyson levou-nos a adotar uma perspectiva mais ampla em física. Eu acho que isso é realmente verdade. É verdade no meu caso.⁵⁴

Nos anos 1950, enquanto as técnicas de Feynman foram ganhando cada vez mais adeptos,⁵⁵ DeWitt continuou ligado ao modo de fazer física de Schwinger. No centro da teoria quântica de campos não estavam diagramas, mas sim funções de Green. Mesmo quando DeWitt começou a utilizar algumas ideias advindas de Feynman em seus trabalhos – sobretudo a integração funcional –, ele o fez a partir de uma perspectiva próxima àquela de Schwinger (ver seção 3.8).

Uma outra característica herdada de Schwinger é o hábito de inventar notações matemáticas. A primeira coisa que Schwinger e DeWitt faziam ao estudar um artigo era rephrasear inteiramente o texto em suas próprias notações. Rephrasear o dito do outro é um primeiro modo de apropriação. Tomar aquilo que pertence ao outro e dizê-lo de outro modo é buscar um lugar para si; é o primeiro passo na ânsia de construção de um lugar próprio. Isso ficará claro quando analisarmos os trabalhos de DeWitt dos anos 1960.⁵⁶

uma possível vantagem. Parece haver, nesta discordância, uma alta dose de orgulho dos debatedores. Nós acreditamos, com DeWitt, que o comentário de Gleick parece ser bastante preciso.

De todo modo, o fato de Schwinger não dar nenhum crédito a Feynman (o que é um fato constatado por todos) é mais grave que o fato (este controverso) dos seus alunos não serem introduzidos às técnicas de Feynman: pois os alunos eram assim privados de tomar conhecimento de toda uma outra perspectiva em teoria quântica de campos, menos formal e mais pragmática. Vale observar que ignorar os trabalhos de Feynman não era uma atitude adotada somente por Schwinger. Neste sentido, vale lembrar a fala de Yang: “[No grupo de física teórica da Universidade de Chicago,] ao final de seis semanas [de trabalho em equipe a fim de entender as anotações do seminário de Schwinger feitas pelos três físicos do grupo que compareceram à conferência – Enrico Fermi, Edward Teller, Gregor Wentzel –], alguém perguntou ‘Não é verdade que Feynman também apresentou [na conferência]?’ Todos os três disseram ‘Sim, sim, Feynman apresentou.’ ‘O que ele disse?’ Nenhum deles sabia dizer. Tudo que eles lembravam era a estranha notação de Feynman: um p com uma barra [\overline{p}].” Yang. **Julian Schwinger**, *op. cit.*, citação p. 176. Ou seja, a desvalorização do trabalho de Feynman em comparação ao de Schwinger não ocorria somente em Harvard.

⁵⁴Entrevista de DeWitt para Schweber, 15.08.1984. Citado em SQED, p. 368.

⁵⁵Cf. Kaiser, David; Ito, Kenji & Hall, Karl. **Spreading the Tools of Theory**: Feynman Diagrams in the United States, Japan, and the Soviet Union. *Social Studies of Science*, v. 34, n. 6, pp. 879-922, 2004.

⁵⁶Aqui podemos fazer uma conjectura, que nos parece verdadeira, mas exigiria um esforço à parte. A controvérsia sobre o fato de Schwinger ensinar ou não os métodos de Feynman – explicitada na última página – tem uma caracterís-

Há ainda uma terceira marca deixada pela tese, a qual não diz respeito a Schwinger, mas sim a Rosenfeld. A questão da quantização da gravitação, iniciada por este, foi, como já dissemos, o grande projeto da vida de DeWitt. Rosenfeld era, para o jovem físico, aquele que iniciara este projeto. Porém, este não tinha como saber o quanto a sua vida intelectual seria influenciada por aquele. Conforme veremos no decorrer deste capítulo, Rosenfeld foi uma das mais importantes referências intelectuais de DeWitt, não somente no que se refere à gravitação, mas também no que se refere à interpretação da teoria quântica, primeiro como um objeto de admiração e posteriormente como objeto de crítica.

3.6 As peregrinações de um jovem doutor (1950-1955)

Findo o doutorado, DeWitt peregrinou por diversos centros de pesquisa, sem conseguir uma posição permanente. Nesta seção, analisaremos estas andanças e as dificuldades por ele encontradas.

Institute for Advanced Studies, Princeton (1949-1950)

A defesa de doutorado estava planejada para meados de 1949, após a qual DeWitt iria, a convite de Robert Oppenheimer, ocupar uma vaga de pesquisador no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton, com duração de um ano. Entretanto, com a morte de seu pai em julho de 1949, a defesa teve que ser adiada. Mesmo sem o título de Harvard, DeWitt foi para Princeton, onde permaneceu durante o segundo semestre de 1949 como um aluno visitante, sem remuneração.

Em janeiro de 1950, ele viajou de Princeton para Harvard para a defesa. A sofisticação do tema da tese fica evidente em uma história contada por DeWitt a um amigo seu no dia da defesa. Quando DeWitt saiu da sala da avaliação, com o título já concedido, ele ouviu Percy Bridgman, um dos avaliadores, prêmio Nobel em 1946 pela sua pesquisa em física de altas temperaturas, murmurar a um outro avaliador “Deve ser boa [a tese]. Eu não entendi uma palavra sequer!”.⁵⁷

tica muito peculiar. Acreditamos ser possível mostrar que Schwinger ensinava sim certas ideias de Feynman em seus cursos, entretanto refraseava-as a tal ponto que temos dificuldades em ver a influência de Feynman em seus argumentos.

⁵⁷E-mail de Richard Hall para Cécile e Chris DeWitt, 22.04.2005. DF, box “Articles”, folder “Bryce’s Students”.



Figura 3.5: Bryce DeWitt, 1951. DF, fotos.

Obtido o título, DeWitt foi finalmente efetivado pesquisador em Princeton, com bolsa do *National Research Council* com duração até junho de 1950.⁵⁸ Durante este período, ele se dedicou a transformar a tese de doutorado em um texto publicável. Foram escritos, assim, dois artigos, que deveriam vir a ser submetidos à revista *Physical Review*.⁵⁹

Ambos eram intitulados “On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions”, seguidos dos subtítulos “I. The Einstein-Mie theory, spinors, the background space, and the approximation method” e “II. Interaction representation, vacuum induced stress, self-energies of mesons and photons”.⁶⁰ Enquanto na tese de doutorado DeWitt tinha lidado somente com os campos eletromagnético e gravitacional, durante o estágio em Princeton ele conseguiu incluir também os campos das fontes. Assim, nestes artigos escritos em Princeton, era

⁵⁸Cf. TPQG, p. 53. Cf. também entrevista de Bryce DeWitt a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

⁵⁹DeWitt, Bryce Seligman. **On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions**, 1950. DF, box “Articles”, folder “PhD thesis”. Infere-se o objetivo de publicação pela rasura na p. 1 da parte 2 do documento. Estes dois artigos têm, juntos, 83 páginas, enquanto a tese tem 152 páginas.

⁶⁰Vale observar que Schwinger também tinha o hábito de escrever artigos numerados em série, as quais eram por vezes bastante longas, chegando, em algumas ocasiões, a ter quatro ou cinco artigos em sequência com o mesmo título.

analisado o sistema físico composto por estes três campos acoplados, todos eles quantizados.

A fim de quantizar este sistema, fazia-se necessário escrever a hamiltoniana do sistema. Isto somente poderia ser feito, na época, no contexto da teoria linearizada. Nesta, o tensor $g_{\mu\nu}$ é escrito na forma

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad , \quad (3.1)$$

onde $\eta_{\mu\nu}$ é a métrica do espaço-tempo plano e $h_{\mu\nu} \ll 1$, e termos de ordem h^2 são descartados. A partir da lagrangiana linearizada da gravitação, pode-se facilmente construir uma hamiltoniana para o campo h , definir as grandezas canonicamente conjugadas e, por fim, quantizar a teoria. Este resultado já era bastante conhecido naquela época.⁶¹

As contribuições de DeWitt foram (1) mostrar que a covariância geral da teoria poderia ser escrita na forma de uma invariância de calibre do campo h , a qual ele denominou “G-invariância”, (2) mostrar que as equações do sistema são G-invariantes,⁶² e (3) mostrar que o cálculo da auto-energia gravitacional do fóton pode ser realizado de modo G-invariante, fornecendo o resultado final zero. Ou seja, como Schwinger sugerira, o fóton não tem auto-energia gravitacional na teoria linear. As duas primeiras demonstrações foram feitas na parte I do artigo, e a terceira, na parte II.

Os dois artigos tinham inúmeros problemas. DeWitt abertamente ignorara a questão das ambiguidades no ordenamento dos operadores nos termos de auto-interação do campo gravitacional. Isto forçou-o a descartar tais termos à mão, sob a alegação de que eles não influenciavam na auto-energia do fóton. Como ele próprio admitia, esta postura deveria ser provisória.⁶³ Entretanto, ainda que problemáticos, DeWitt imaginava que os artigos eram o início de uma pesquisa, que deveria ser melhor desenvolvida posteriormente. Segundo ele, tratava-se de um “formalismo preliminar de um tratamento quântico perturbativo da interação de campos de onda com a gravitação”.⁶⁴

⁶¹Estando presente, e.g., em Bergmann. **Introduction to the Theory of Relativity**, *op. cit.*, pp. 180-183.

⁶²Isto envolvia uma cuidadosa revisão do formalismo de Pauli para campos espinoriais em espaços-tempos curvos. Pauli, Wolfgang. **Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten, Teil I: Klassische Theorie**. Annalen der Physik, v. 410, n. 3, pp. 305-336, 1933. *Idem*. **Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten, Teil II: Die Diracschen Gleichungen für die Materiewellen**. Annalen der Physik, v. 410, n. 4, pp. 337-372, 1933.

⁶³Cf. DeWitt. **On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions**, *op. cit.*, I, p. 3.

⁶⁴*Wave fields* é uma denominação arcaica para o que hoje chamaríamos somente de campos. Ela era utilizada por

Estes dois artigos nunca foram publicados, pois em 1950 ocorreu uma reviravolta na pesquisa em gravitação quântica. No ano anterior, Peter Bergmann e Paul Dirac mostraram, independentemente, que sistemas com simetria de calibre são sistemas hamiltonianos vinculados e desenvolveram um método de construção de hamiltonianas para tais sistemas.⁶⁵ Valendo-se deste método, diversos pesquisadores de gravitação chegaram independentemente a uma formulação hamiltoniana da teoria da relatividade geral.⁶⁶ Com isso, não mais era necessário se trabalhar na aproximação de campo fraco a fim de se escrever a hamiltoniana, sendo possível escrever a hamiltoniana da teoria completa. Este resultado alterou completamente a perspectiva da pesquisa em quantização da gravitação.

Face a estes acontecimentos, os dois artigos de DeWitt, por lidarem com a hamiltoniana do sistema linearizado, perdiam consideravelmente a relevância. Ele ficou sabendo de tais desenvolvimentos logo no início de 1950, por meio de Alfred Schild, que lhe enviou uma cópia de seu artigo com Pirani antes mesmo dele ser publicado, e evidentemente entendeu o que se passava. No primeiro artigo da série, ele tenta se defender:

A utilização de uma formulação provisória [para a questão da ambiguidade no ordenamento dos fatores do termo de auto-interação do campo gravitacional] foi causada por uma questão

DeWitt para diferenciar campos que são funções definidas no espaço-tempo (como o eletromagnético e o elétron-pósitron) do campo gravitacional, que é relacionado às próprias propriedades do espaço-tempo.

⁶⁵Bergmann, Peter. **Non-Linear Field Theories**. PREV, v. 75, pp. 680-685, 1949. Dirac, Paul. **The Dynamical Theory of Fields**. Canadian Mathematical Congress, University of British Columbia, agosto de 1949. Posteriormente publicado em Dirac, Paul. **Generalized Hamiltonian Dynamics**. Canadian Journal of Mathematics, v. 2, pp. 129-148, 1950.

A existência desta equivalência pode ser facilmente compreendida da seguinte forma: a simetria de calibre indica que há mais variáveis dinâmicas do que graus de liberdade do sistema, logo há alguma restrição na dinâmica conjunta de tais variáveis, ou seja, algum vínculo na dinâmica do sistema. A razão pela qual sistemas vinculados não podem ser trivialmente quantizados também é bastante simples. Tomemos o caso de um pêndulo com as coordenadas escritas em forma polar. O momento conjugado à componente radial da posição (r) é identicamente zero: $p_r = 0$. Ou seja, ao escrevermos o parênteses de Poisson entre esta componente e o seu momento conjugado, temos $\{r, p_r\} = 1$, ou seja, $0 = 1$, o que é absurdo. Assim, é necessário algum modo de contornar o problema, ou seja, é necessário um método de quantização mais sofisticado que a quantização canônica para dar conta da teoria quântica de sistemas vinculados.

A história da quantização sistemas vinculados foi recentemente estudada em: Salisbury, Donald. **Léon Rosenfeld and the challenge of the vanishing momentum in quantum electrodynamics**. SHMP, v. 40, pp. 363-373, 2009. Salisbury, Donald. **Léon Rosenfeld's pioneering steps toward a quantum theory of gravity**. Journal of Physics: Conference Series, v. 222, artigo n. 012052, 2010.

⁶⁶Pirani, Felix & Schild, Alfred. **On the Quantization of Einstein's Gravitational Field Equations**. PREV, v. 79, pp. 986-991, 1950. Bergmann, Peter & Brunings, Johanna. **Non-Linear Field Theories II**. Canonical Equations and Quantization. Reviews of Modern Physics, v. 21, n. 3, pp. 480-487, 1949.

de pressa.⁶⁷ No momento em que estes artigos começaram a ser escritos, ninguém tinha ainda construído explicitamente uma Hamiltoniana gravitacional para a teoria [da relatividade] geral. [Nota de rodapé: F. A. E. Pirani e A. E. Schild, e independentemente, P. G. Bergmann e colaboradores acabaram de conseguir formular a requerida função Hamiltoniana. (...)] Uma formulação hamiltoniana do campo gravitacional “linearizado”, entretanto, é uma questão simples e pode ser levada a cabo por métodos bem conhecidos.⁶⁸

Ainda que corresse para publicar os dois artigos, não haveria saída para DeWitt. Ou ele reformulava os seus cálculos no contexto de sistemas hamiltonianos vinculados, ou ele teria de desistir de publicá-los. DeWitt parece reconhecer esta fatalidade, ainda que hesitantemente: “Pode ser eventualmente interessante reformular algumas dos presentes cálculos segundo o procedimento rigoroso de Pirani-Schild-Dirac”⁶⁹ O fato é que tal reformulação era necessária. Os novos desenvolvimentos da pesquisa em gravitação de 1949 e 1950 tornaram os cálculos do doutorado de DeWitt completamente obsoletos e, com isso, impublicáveis.

O ano letivo em Princeton teria sido uma grande frustração pessoal se não fosse o fato de DeWitt ter vindo a conhecer a jovem física francesa Cécile Morette-Payen.

Cécile nasceu em Caen, no noroeste da França em janeiro de 1922. Seu pai, Andre Pierre Ernest Morette, formado na École Polytechnique, foi durante muitos anos professor na École des Mines de Saint-Etienne. Pouco antes de Cécile nascer, ele foi contratado para dirigir a Société Metallurgique de Normandie, localizada em Caen, empresa da qual ele veio a se tornar, em 1923, o presidente. Após a morte de seu pai, em 1931, a família continuou morando em Caen, onde sua mãe, Marie-Louise Claire Ravaudet, veio a se casar, em 1932, com Maurice Payen.⁷⁰

Cécile graduou-se em Ciências na Universidade de Caen em 1942 e obteve, junto às autoridades alemãs que ocupavam a Normandia, uma autorização para ir estudar em Paris, ingressando na

⁶⁷ Leia-se, pressa em publicar logo os resultados do artigo.

⁶⁸ DeWitt. **On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions**, *op. cit.*, I, pp. 3.

⁶⁹ *Ibid.*

⁷⁰ Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos. Cf. também a homenagem a Cécile Morette-DeWitt na página da Universidade do Texas em Austin: http://www.ph.utexas.edu/utphysicshistory/UTexas_Physics_History/Cecile_DeWitt-Morette.html (acessado 30.08.2013)



Figura 3.6: Cécile Morette-Payen, 1951. DF, fotos.

Universidade de Paris. No “dia D”, 6 de julho de 1944, após a chegada dos Aliados em solo francês, Caen foi intensamente bombardeada, causando a morte da mãe, da avó e de uma das duas irmãs de Cécile. Diante da trágica situação, seu padrasto implorou que ela ficasse em Paris.

Em 1946 ela entrou para o laboratório de física nuclear de Frédéric e Irène Joliot-Curie. Frédéric Joliot-Curie esperava que Cécile, que tinha uma boa formação em física teórica, pudesse ajudá-los a compreender alguns artigos teóricos.⁷¹ A ela caberia também a função de secretária pessoal de Frédéric e preparadora de seus cursos na universidade.⁷²

Cécile se interessava pela física quântica, entretanto a formação nesta área era extremamente

⁷¹O primeiro artigo que Cécile teve que ler e explicar a Frédéric Joliot-Curie foi o famoso artigo de Niels Bohr e John Wheeler sobre fissão nuclear de 1946. Cf. Cécile Morette-DeWitt em entrevista a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

⁷²Segundo Cécile conta, não havia, entre os físicos, nenhum preconceito pelo fato de ela ser mulher. A única vez que ela foi alvo de uma piada foi quando Joliot disse, em tom de brincadeira, “Eu fico lhe ensinando uma série de coisas e depois você vai casar, e isso não vai servir de nada!”. Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos. A entrevista não foi gravada; assim, a citação, possivelmente imprecisa, vem de anotações feitas durante a entrevista. Vale observar, Irene (e não Joliot!) era a diretora do laboratório.

precária na França. “O país de Poincaré, Langevin, Brillouin e Louis de Broglie não oferecia nenhum curso básico em física moderna”.⁷³ Assim, ela decidiu ir em busca de novos lugares, onde pudesse aprender. Em 1947 ela concluiu o seu doutorado e foi para Dublin (1947-1948), onde estava Walter Heitler, depois para Copenhague (1948-1949) e, por fim, para Princeton (1949-1951). A sua pesquisa em Paris, em Dublin, e em Copenhague foi voltada ao estudo teórico de mésons, em particular ao modelo de Christian Møller e Léon Rosenfeld.⁷⁴ Em Princeton, Cécile se aproximou da física matemática, sobretudo após uma breve estada em Berkeley em 1949, na qual aprendeu muito sobre as integrais de caminho de Feynman.⁷⁵

Tendo interagido com importantes grupos, lecionado em diversos países e com um enorme controle da física da época, em particular das integrais de caminhos de Feynman, Cécile era reconhecida como uma das mais promissoras pesquisadoras de sua época. Segundo Freeman Dyson, ela foi “a primeira pessoa da geração mais jovem [em 1948] a compreender completamente o escopo e o poder das integrais de caminho de Feynman na física”.⁷⁶

Em Princeton, Cécile era uma *protégée* de Oppenheimer.⁷⁷ Bryce também, como vimos, era bastante apoiado por Oppenheimer, tanto no período da guerra quanto na ida para Princeton mesmo sem o doutorado. Lá, os dois jovens se conheceram e ele a pediu em casamento. Aceitar a proposta de DeWitt não foi simples. Cécile recebeu em dezembro de 1949 um convite para se tornar professora da Universidade de Nancy, que estava sendo reestruturada sob a influência do grupo Bourbaki; no início de 1950, veio o convite para ser professora na École Normale Supérieure; e em seguida recebeu o convite para se tornar a diretora na sucursal europeia de uma pequena, mas

⁷³Pole, Joyce. **French government honors faculty member**: Professor DeWitt-Morette named a knight in National Order of Merit. On Campus, exemplar da quinzena de 24 de novembro a 7 de dezembro, 1980.

⁷⁴Rosenfeld, Léon & Møller, Christian. **Electromagnetic properties of nuclear systems in meson theory**. Mat.-fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., v. 20, n. 12, pp. 1-66, 1943.

⁷⁵Entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

A grande erudição de Cécile sobre física de sua época pode ser observada no seu livro de 1949, talvez o primeiro livro-texto a discutir integrais de caminho. Morette-Payen, Cécile. **Particules élémentaires**. Suivi de “Guide to literature of elementary particle physics”, par Cécile Morette-Payen, Jayme Tiomno, et John Archibald Wheeler (Actualités Scientifiques et Industrielles v. 1131). Paris: Hermann, 1951. Vale mencionar que este livro é composto pelas notas de aula do curso por ela ministrado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro, em 1949. O convite para lecioná-lo foi feito por intermédio de Oppenheimer.

⁷⁶Dyson, Freeman. **Feynman at Cornell**. Physics Today, v. 42, n. 2, p. 32, 1989.

⁷⁷E-mail de Richard Hall para Cécile e Chris DeWitt, 22.04.2005. DF, box “Articles”, folder “Bryce’s Students”.

promissora, empresa chamada *International Business Machines*. Declinando todos os convites de emprego, Cécile aceitou o pedido de casamento.⁷⁸

Em 1949, antes do pedido de casamento, Bryce tinha se envolvido em uma discussão com o renomado físico austríaco Wolfgang Pauli, discussão esta que o levou a ser convidado para ir trabalhar durante alguns meses no Instituto Politécnico de Zurique.

Physikalisches Institut der E.T.H., Suíça (1950)

Um desentendimento diplomático ocorreu em 1949 entre Schwinger e Wolfgang Pauli. Aquele enviou para este um exemplar de um artigo seu recém publicado,⁷⁹ ao que Pauli escreveu, em janeiro de 1949, uma longa carta em resposta, questionando certas passagens matemáticas. Schwinger não respondeu a carta.

Poucos meses depois, no dia 1º de abril de 1949, de forma descorrelacionada aos acontecimentos de janeiro, DeWitt escreveu a Pauli contando de sua pesquisa e perguntando se seria possível ele passar um período trabalhando com Pauli em Zurique, na Suíça.⁸⁰ Pauli respondeu de modo muito atencioso e, provavelmente sem saber que o problema do doutorado de DeWitt tinha sido proposto por Schwinger, disse que DeWitt estava lidando com o problema errado.

Muito me interessou saber, pela sua carta de 1º de abril, que você está trabalhando na aplicação do formalismo covariante de Schwinger ao problema da interação da luz com um campo gravitacional na aproximação de campo fraco. A sua tarefa principal aqui não deve ser mostrar que numa teoria invariante de calibre a energia de auto-interação gravitacional é nula, o que é algo trivial, mas sim investigar em que medida o formalismo de Schwinger, se aplicado a este problema, leva a resultados invariantes de calibre, o que é longe de ser algo trivial. (...) Eu espero encontrar este ponto cuidadosamente discutido em sua tese.⁸¹

DeWitt mostrou a carta de Pauli a Schwinger, que por sua vez propôs que DeWitt respondesse

⁷⁸Grinstein, Louise *et alii* (eds). **Women in Chemistry and Physics: A Biobibliographic Sourcebook**. New York: Greenwood, 1993, pp. 150-161.

⁷⁹Tratava-se do artigo Schwinger, Julian. **Quantum electrodynamics II**. PREV, v. 75, n. 4, pp. 651-679, 1949.

⁸⁰Esta carta está perdida.

⁸¹Carta de Wolfgang Pauli para Carl Bryce Seligman [DeWitt], 08.04.1949. DF, box “Letters”, folder “Pauli”. Provavelmente, foi por esta sugestão de Pauli que DeWitt formulou o conceito de G-invariância que mencionamos.

a carta de Pauli de janeiro, a qual estava intimamente ligada à questão da invariância de calibre. DeWitt o fez, porém cometeu um erro: enviou a carta a Pauli sem mostrá-la a Schwinger. DeWitt menciona na carta que a sua resposta “não teve a aprovação” de Schwinger. Este episódio causou um grande mal estar. Pauli escreveu a Oppenheimer:

Minha discussão com Schwinger, da qual ele nunca participou ele próprio, faz-me pensar na psicologia de “Sua Majestade” (Julian) (...) Sua Majestade permitiu que um dos seus pupilos (B. Seligman) quebrasse o “bloqueio” entre o ETH/Zurique e Harvard e me escrevesse uma carta, mas *ele se recusou a ler* a carta! O conteúdo desta carta (era uma carta muito longa) era simplesmente este, que a Sua Majestade teve uma espécie de revelação em algum Monte Sinai de sempre colocar $\frac{\partial \Delta^{(1)}}{\partial x_\nu} = 0$ para $x = 0$ (...) sempre que [esta derivada] aparecer. Estamos chamando aqui esta equação de “a revelação”, mas isto não nos ajuda a compreendê-la. Este B. Seligman e também o Sr. Glauber querem vir aqui [Zurique] na próxima primavera [1950], mas ambos são incapazes de obter uma recomendação científica de Sua Majestade, que prefere “sacrificar” ambos a me escrever. Estou me divertindo muito com esta situação.⁸²

O conflito acabou se resolvendo de maneira amistosa. Schwinger visitou Pauli na Suíça no verão de 1949 e DeWitt se encontrou pessoalmente com ele em Princeton em novembro de 1949.⁸³ Por fim, foi concedida a carta de recomendação. DeWitt esteve na Suíça de junho a dezembro de 1950, enquanto Cécile, que já era sua noiva, continuou como pesquisadora em Princeton.

Ao fim do período em que trabalhou com Pauli, DeWitt tinha um currículo bastante esquizo-frênico, que incluía um diploma de doutorado de Harvard sob a orientação de Schwinger; dois estágios de pesquisa em centros de excelência, Princeton e E.T.H; e nenhum artigo publicado ou enviado para publicação. Não seria um anacronismo dizermos que isso era algo completamente atípico, posto que os demais alunos de Schwinger em geral publicavam seus artigos ainda no doutorado. DeWitt era um jovem físico que todos admiravam, mas que não tinha apresentado nenhum resultado. Talvez por uma perda de credibilidade, talvez por uma busca por isolamento, talvez por um fascínio por expedições e aventuras, ele acabou indo parar em Bombai, na Índia.

⁸²Carta de Wolfgang Pauli para Robert Oppenheimer, s/d 1949, *apud* SQED, p. 351.

⁸³Cf. Mehra & Milton. **Climbing the Mountain**, *op. cit.*, p. 265 e pp. 304-306.

Tata Institute of Fundamental Research, Índia (1950-1951)

No início de dezembro de 1950, DeWitt partiu sozinho do porto de Gênova para Bombai.⁸⁴ Com uma bolsa de pesquisa da Fundação Fullbright com duração de dois anos, ele se instalou no *Tata Institute of Fundamental Research*. Pouco sabemos dos meses que ele passou por lá.

Tudo que os arquivos nos dizem é que ele participou de uma conferência internacional sobre partículas elementares, realizada no Tata Institute sob os auspícios da UNESCO, onde reportou alguns resultados recentes de Enrico Fermi sobre desintegração atômica.⁸⁵ Durante alguns meses, DeWitt trabalhou em diversos cálculos de quantização da gravitação, mas não chegou a concluir nenhum artigo. Em fevereiro ou março, ele apresentou um quadro médico de icterícia e teve que antecipar a sua volta para casa.⁸⁶ Bryce e Cécile se casaram em Paris no dia 26 de abril de 1951.

A escola de verão em Les Houches, França (1951)

Sentindo-se culpada por casar-se com um estrangeiro, Cécile resolveu fazer algo pela França. Lembrando-se da dificuldade que tivera em obter uma formação em física moderna quando era aluna, ela teve a ideia de criar uma escola de verão. Com o auxílio do governo francês, ela fundou, em julho de 1951, a *École d'Été de Physique Théorique de l'Université de Grenoble*, que posteriormente veio a ser denominada *École de Physique de les Houches*.⁸⁷

A escola, com duração de cerca de dois meses, ocorria todos os verões em Les Houches, um vilarejo nos Alpes franceses. O programa incluía um curso introdutório de mecânica quântica e um curso introdutório de mecânica estatística. Depois de 1958, quando já era possível obter esta formação nas universidades francesas, a escola foi remodelada e passou a fornecer cursos de

⁸⁴Carta de Travelbureau J. Ouboter para DeWitt, 08.11.1950. DP, box 4RM174, folder "Research files: Early notes".

⁸⁵Seligman, Bryce. **A Report on Two Papers by Professor Fermi on High Energy Nuclear Events**. Report of an International Conference on Elementary Particles held at the Tata Institute of Fundamental Research, Bombay, on 14-22 December 1950. DF, box "Articles", folder homônimo ao artigo.

⁸⁶Cf. carta de Pauli para Bryce e Cecile Seligman, 30.04.1951. Cópia reproduzida em http://www.ph.utexas.edu/utphysichistory/UTexas_Physics_History/Cecile_DeWitt-Morette.html (acessado 30.08.2013)

⁸⁷Weinberg, Steven. **Bryce Seligman DeWitt, 1923-2004**, *op. cit.*, p. 5. Cf. também a homenagem a Cécile Morette-DeWitt na página da Univeridade do Texas em Austin, *op. cit.*

tópicos específicos, sendo cada ano dedicada a um tema.⁸⁸

De volta a Bombai (1951-1952)

Acabada a primeira edição de escola, o casal resolveu ir para a Índia, a fim de que Bryce concluísse o estágio de pesquisa no Tata Institute. Em setembro de 1951 Bryce pegou o navio para Bombai, desta vez em companhia de Cécile, que já estava grávida de Nicolette, a primeira filha do casal. Bryce tinha então 28 anos e nenhum artigo publicado. Como ele descreveu posteriormente, em 1975, numa carta à fundação Guggenheim,

No início de 1950, fiquei sabendo de um trabalho recente de Dirac, que prometia colocar o programa da quantização [da gravitação] em uma base sistemática. Explorações dos novos caminhos de pesquisa abertos por este trabalho me deixaram inteiramente ocupado durante a primeira metade de 1950, enquanto eu estava no Instituto [de Estudos Avançados de Princeton], durante a segunda metade de 1950 na Eidgenössische Technische Hochschule em Zurique e durante o ano seguinte como pesquisador bolsista da Fullbright no Instituto Tata de Pesquisa Fundamental.⁸⁹

É significativo que mesmo em 1975, quando já tinha se tornado um pesquisador bastante conceituado, DeWitt tivesse que escrever, em um pedido de bolsa, um parágrafo quase que justificando o que fizera durante quase três anos de concluído o seu doutorado, uma vez que nada poderia ser inferido acerca desta época ao se analisar a sua lista de publicações.

A improdutividade de DeWitt foi quebrada em setembro de 1951, quando ele enviou para a revista *Physical Review* o artigo “Transformações Pontuais em Mecânica Quântica”.⁹⁰ Curiosamente o artigo não tem nenhuma intersecção com a pesquisa do doutorado de DeWitt e nem tampouco com os dois artigos que ele escreveu em Princeton. Enquanto nestes textos ele tinha ignorado a ambiguidade na ordenação dos operadores do campo gravitacional, neste artigo finalizado em 1951, abordou exatamente esta questão.⁹¹ Ele mostrou que, por meio de um critério de

⁸⁸Cf. TPQG, pp. 100-101.

⁸⁹DeWitt, Bryce. **Application to Guggenheim Fellowship**, c. 1975. DF, box “The Pursuit”.

⁹⁰DeWitt, Bryce. **Point Transformations in Quantum Mechanics**. PREV, v. 85, n. 4, 1952.

⁹¹Para uma introdução ao problema de ordenamento de operadores na mecânica quântica, cf. Hartz Maia, Thiago.

covariância das teorias, é possível se definir de modo preciso o ordenamento, pondo fim à questão da ambiguidade da ordenação. Ao final do artigo, ele aplica o seu resultado geral ao problema específico da gravitação, obtendo uma hamiltoniana quantizada para a relatividade geral. A grande vantagem do seu método, que pode ser criticado por diversas razões, é fornecer uma hamiltoniana da teoria quântica da relatividade geral que é explicitamente covariante.

Um segundo artigo, intitulado “The Quantum Theory of Interacting Gravitational and Spinor Fields”, foi escrito logo em seguida. Este texto se aproxima das questões levantadas por DeWitt em seu doutorado, ainda que de uma perspectiva bastante diferente da original. Tanto a tese como este artigo buscam uma formulação do eletromagnetismo em interação com um campo gravitacional quantizado, porém o artigo de 1952 não utiliza a hamiltoniana da aproximação de campo fraco, base dos desenvolvimentos da tese, sendo formulado inteiramente no contexto da formulação hamiltoniana da relatividade geral, em particular no formalismo de Felix Pirani e Alfred Schild.

Como dissemos, com os trabalhos de Dirac, Bergmann, Pirani, Schild e outros, publicados por volta de 1950, fazia-se necessário que DeWitt rescrevesse a tese neste formalismo. É exatamente isso que é feito nesse artigo. Como o artigo não utiliza a decomposição de campo fraco (equação 3.1), a proposta de uma G-invariância do campo $h_{\mu\nu}$, ideia central dos primeiros escritos de DeWitt, teve de ser completamente abandonada. Ou seja, para passar para o formalismo de Pirani

Estudos de teoria quântica de campos com comprimento fundamental. Dissertação de Mestrado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2011, em particular pp. 15-45.

Não é nosso intuito entrar aqui nos pormenores matemáticos dos trabalhos de DeWitt. Assim, expliquemos brevemente nesta nota de rodapé qual era o problema em questão. Caso haja, em uma função hipotética $f : (a_1, \dots, a_n) \mapsto f(a_1, \dots, a_n)$, algum produto das variáveis a_i , a quantização não pode ser realizada trivialmente por meio de uma substituição $a_i \mapsto \hat{a}_i$. Por exemplo, como deveríamos quantizar, no caso de uma partícula movendo-se no plano (q_1, q_2) , o quadrado do momento angular

$$L^2 = q_1^2 p_2^2 + q_2^2 p_1^2 + 2q_1 q_2 p_1 p_2 \quad ?$$

O resultado deveria ser $\mathcal{L}^2 = q_1^2 p_2^2 + q_2^2 p_1^2 - 2q_1 q_2 p_1 p_2$ ou $\mathcal{L}^2 = q_1^2 p_2^2 + q_2^2 p_1^2 - 2p_1 p_2 q_1 q_2$? Em outras palavras, qual a ordenação dos fatores que devemos considerar como sendo a ordenação correta? Uma vez que os operadores q_i e p_i não comutam, estas duas expressões são distintas e faz-se necessário escolher qual delas representa corretamente o momento angular do sistema quantizado. (A prescrição padrão é a simetrização, ou seja,

$$\mathcal{L}^2 = q_1^2 p_2^2 + q_2^2 p_1^2 + q_1 q_2 p_1 p_2 + p_1 p_2 q_1 q_2 \quad ,$$

que garante que o operador \mathcal{L}^2 seja hermitiano.) Uma vez que a teoria da relatividade geral é não-linear, aparecem produtos do campo gravitacional no termo de auto-interação da hamiltoniana do sistema e, portanto, há uma ambiguidade na ordenação dos operadores de campo. Essa é a questão que DeWitt tentou resolver no artigo em questão. A história do ordenamento de operadores em teoria quântica de campos é bastante interessante e ainda está por ser escrita.

e Schild, DeWitt teve que reformular inteiramente a argumentação de sua tese. Em meio a esta reformulação, o problema da auto-energia gravitacional do fóton foi completamente esquecido. DeWitt não menciona o problema em nenhum de seus artigos publicados.

O artigo foi escrito em colaboração com Cécile, o que fez com que ele ficasse conhecido como “the wedding announcement” de Bryce e Cécile.⁹² O artigo foi concluído em Bombai no início de 1952 e publicado na *Physical Review* em julho do mesmo ano.⁹³

Além dos dois artigos, o período em Bombai rendeu outro importante resultado acadêmico, certamente mais importante para a trajetória de DeWitt que os dois artigos. Fascinado pelo artigo de Niels Bohr e Léon Rosenfeld publicado em 1933, Bryce pediu que Cécile fizesse uma tradução do mesmo da língua alemã para a língua inglesa.⁹⁴ Em Paris, Cécile tinha sido aluna de Jean Louis Destouches, o que fez com que ela tomasse horror a discussões sobre interpretação da teoria quântica. Porém, como era um pedido de Bryce, ela se empenhou em fazer uma tradução. Com poucos conhecimentos da língua alemã, o resultado final ficou bastante insatisfatório. Sem se basear em uma linha da tradução de Cécile, Bryce começou ele próprio uma tradução.⁹⁵ O fato de Bryce ter descartado inteiramente a tradução de Cécile não reflete uma desconsideração com ela, mas sim uma postura geral dele com relação ao trabalho acadêmico. DeWitt nunca gostou de se basear no que foi feito pelas outras pessoas, querendo sempre fazer as coisas ele próprio.⁹⁶ A familiaridade que DeWitt obteve com o trabalho de Bohr e Rosenfeld devida a esta tradução foi fundamental para os seus trabalhos do final da década de 1950, conforme veremos mais adiante.

⁹²Cf. TPQG, p. 56. Vale observar que este foi o único artigo escrito por eles em colaboração.

⁹³DeWitt, Bryce Seligman & DeWitt, Cécile Morette (nesta época, ela ainda não utilizava o sobrenome composto). **The Quantum Theory of Interacting Gravitational and Spinor Fields**. PREV, v. 87, n. 1, 1952 (apesar de ser o número 1 do volume 87, este fascículo do jornal foi publicado somente em 01.07.1952, por motivos que desconhecemos).

⁹⁴Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen**. Mat.-Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk., bd. 12, n. 8, pp. 1-65, 1933.

⁹⁵Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **On the Question of the Measurability of the Electromagnetic Field Strengths**, translated by Bryce DeWitt, undated. DP, box 4RM189, folder homônimo ao texto.

⁹⁶Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

A segunda edição da escola de verão em Les Houches, França (1952)

Em junho de 1952, com dois excelentes artigos e uma carreira que começava a se consolidar, chegou ao fim do período da bolsa da fundação Fullbright e, com isso, Bryce e Cécile concluíram a sua estada em Bombai. Alguns dias antes do embarque de volta à Europa, nasceu Nicolette Kim, cujo primeiro nome foi escolhido em homenagem à irmã de Cécile que falecera no bombardeio de Caen. Kim, o segundo nome, significa “a pequena amiga do mundo”. Os DeWitt escolheram este nome pois ela tinha três nacionalidades: indiana, francesa e norte-americana.

Cécile foi com Nicolette diretamente para a França, a fim de organizar a segunda edição da escola de verão em Les Houches. Para esta edição, ela convidou Léon Rosenfeld para lecionar uma disciplina de sua escolha.⁹⁷ O convite era uma retribuição pelo apoio que ele tinha dado à escola desde o seu início. Antes do primeiro ano da escola, ele enviou, a pedido de Cécile, alguns livros para comporem a biblioteca.⁹⁸

Para este primeiro ano da escola, Rosenfeld enviou tantas candidaturas de estudantes que Cécile teve de lhe escrever pedindo desculpas por não poder aceitar todos.⁹⁹ Esta carta nos diz muito sobre a relação entre eles. Apesar da formalidade, indicada pelo pronome *vous* e pelo vocativo *cher monsieur*, o que nos mostra não haver uma relação pessoal, ela expressa uma grande admiração pelo físico belga.

Os candidatos ingleses se apresentam como um grave problema, uma vez que todos os pedidos merecem admissão e eu queria muito poder aceitar todos os alunos que o senhor (*vous*) recomendou. (Faz ainda pouco tempo que era para mim que o senhor escrevia cartas de recomendação!)¹⁰⁰

⁹⁷Carta de Cécile Seligman DeWitt (*sic*) para Rosenfeld, 06.09.1951. RP, 7-4-2.

⁹⁸Carta de Cécile Morette Seligman (*sic*) para Rosenfeld, 11.06.1951. RP, 7-4-2. Carta de Cécile Morette Seligman (*sic*) para Léon Rosenfeld, 29.06.1951. RP, 7-4-2.

⁹⁹No seu primeiro ano, a escola acolheu 30 alunos e recebeu cerca de 200 candidaturas, das quais 5 eram de alunos de Rosenfeld, sendo 3 ingleses e 2 indianos. Vale observar, ele era, nesta época, professor na Universidade de Manchester.

¹⁰⁰Carta de Cécile Morette para Léon Rosenfeld, 29.06.1951, *op. cit.* É difícil precisarmos a proximidade entre Cécile DeWitt e Léon Rosenfeld antes de julho 1951. Vale observar que Rosenfeld foi convidado para o casamento do casal. Cf. Invitation pour le Sacrement de Mariage de Mademoiselle Cécile Morette-Payen et Monsieur Bryce Seligman De Witt (*sic*) à l'Église de la Cité Universitaire, Gentilly, le mercredi 2 May 1951. RP, 7-4-2. Em uma carta, já de 1952, ela conta detalhes pessoais da sua estada em Bombai. “Sinto-me ainda tão estrangeira aqui [em Bombai]”, ela confessa. Carta de Morette-DeWitt para Rosenfeld, 21.02.1952.

Numa outra carta, também relativa ao primeiro ano da escola, ela o convida para visitar Les Houches durante alguns dias do verão e apresentar um seminário.¹⁰¹ Não se tratava ainda de um convite para lecionar uma disciplina, como viria a ocorrer no ano seguinte. Cécile queria contar com a presença de alguns professores renomados, aos quais não se pedia que lecionassem cursos, mas sim que simplesmente estivessem presentes, pudesse ser útil para consolidar a escola, e buscou apoio junto àqueles que tinha mais proximidade. Um convite semelhante foi feito para poucas pessoas, entre as quais Wolfgang Pauli, com quem os DeWitt tinham, em 1951, uma relação já bastante próxima.¹⁰² Entretanto o plano não deu muito certo. Rosenfeld disse que tentaria ir, mas que não poderia afirmar com certeza, e Pauli disse que talvez fosse, mas somente por alguns dias.¹⁰³ Isso fez com que ela enviasse um pedido de auxílio emergencial a ambos. Pauli, ao que parece, mudou drasticamente de postura, e acabou por lecionar um curso na escola. Rosenfeld disse que poderia tentar ir, mas achou melhor escrever a Bohr, em Copenhague, solicitando ajuda. Bohr, ao que parece, escreveu a diversos físicos, resolvendo o problema. A mobilização de Copenhague foi tão efetiva que Cécile escreveu a Rosenfeld dizendo-lhe que não era mais necessário que ele mudasse os seus planos para comparecer.

A escola [já] está, no momento, bem instalada e os alunos se puseram seriamente a trabalhar. No que se refere à visita de professores e seus seminários, a situação melhorou muito depois da “súplica” que eu lhe fiz lançar a Copenhague e eu acredito que já temos com o que ocupar os nossos alunos. Se eu não preciso mais pedir que o senhor se locomova a qualquer preço, isso não significa que nós seríamos menos felicíssimos (*moins très hereux*) se o senhor vier nos ver neste ano. Se, por outro lado, a resolução da situação lhe parecer não mais justificar a sua visita, eu recordo-lhe que nós seríamos extremamente felizes se o senhor pudesse se planejar para uma longa estada no próximo ano.¹⁰⁴

Com a situação resolvida, Rosenfeld acabou não indo.¹⁰⁵ Numa carta, meses depois, Cécile

¹⁰¹Carta de Cécile Morette para Léon Rosenfeld, 25.03.1951. RP, 7-4-2.

¹⁰²Cf. carta de Pauli para Bryce e Cecile Seligman, 30.04.1951, *op. cit.* Sobre a proximidade de Dewitt e Pauli, cf. carta de DeWitt a Karl von Meyenn, 12.09.1991. DF, box “Letters”, folder “Pauli”.

¹⁰³Cf. carta de Pauli para Bryce e Cecile Seligman, 30.04.1951, *op. cit.*

¹⁰⁴Carta de Cécile Seligman DeWitt (*sic*) para Léon Rosenfeld, 25.07.1951. RP, 7-4-2.

¹⁰⁵Cf. carta de Cécile Seligman DeWitt (*sic*) para Rosenfeld, 06.09.1951, *op. cit.* Cf. também “Liste de Participants [de l’École de les Houches] 1951-1967”. WP, Series I, Box “Co-De”, folder “DeWitt-Morette, Cécile”.

lhe agradece mais uma vez e diz “Nós somos verdadeiramente muito gratos por tudo que o senhor tem feito pela Escola”.¹⁰⁶

Todos estes acontecimentos de 1951 já foram muito significativos, mas a relação entre Cécile DeWitt e Léon Rosenfeld se estreitou ainda mais em 1952, no segundo ano da escola. Rosenfeld aceitou o convite de lecionar um curso longo e escolheu a disciplina física estatística.¹⁰⁷ Rosenfeld foi aos Alpes com sua esposa, Yvonne, a qual cuidou de Nicolette, então com alguns meses de vida, durante todo o verão, ganhando dos DeWitt o apelido carinhoso de “our babysitter”.¹⁰⁸ Em 1959, Cécile escreveu a Rosenfeld, na contra-face de um postal no qual anunciava o nascimento de sua quarta filha:

Lembro-me com prazer daquela sessão da escola de verão (1952) na qual a senhora Rosenfeld cuidou (*pouponner*) de Nicolette – Naquela época, eu achava que um bebê era [tanto] trabalho [que exigia] dedicação exclusiva!..¹⁰⁹

Podemos inferir, a partir de uma carta do diretor de educação superior do Ministério da Educação francês, Pierre Donzelot, que Rosenfeld gostou muito da sua estada em Les Houches em 1952.¹¹⁰ Ele participou novamente da escola em 1957, lecionando dois cursos – “Problemas de espalhamento” e “Partículas Elementares”. Marie-Simone Detoef, que auxiliava, junto com seu marido Jean-François Detoef, Cécile na organização da escola, escreveu agradecendo a presteza com que Rosenfeld lhe enviara as suas notas de aula para distribuição para os alunos.¹¹¹

Todo mundo está feliz em reconhecer nesta rapidez a influência benéfica de Yvonne e a agradece! No momento, estaria fora de cogitação questionar [atribuí-la] o título de “best physicist’s wife in the world”; e nós, da escola de verão, sentimos por ela uma dívida ainda maior de-

¹⁰⁶Carta de Cécile Morette DeWitt para Rosenfeld, 20.05.1952. RP, 7-4-2.

¹⁰⁷Vale observar, Cécile ofereceu a Rosenfeld o curso de mecânica quântica, entretanto ele optou por mecânica estatística. O mesmo curso lecionado por Rosenfeld em Les Houches foi também lecionado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro, em 1953. Cf. Rosenfeld, Léon. **Statistical mechanics**. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

¹⁰⁸Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

¹⁰⁹Carta de Cécile Seligman DeWitt (*sic*) para Léon Rosenfeld, 25.07.1951. RP, 7-4-2.

¹¹⁰Carta de P. Donzelot a Rosenfeld, 27.09.1952. RP, 7-4-2. Donzelot foi quem apoiou a criação da escola junto ao governo francês, cf. Archimèdes, émission du 30 octobre 2001 (em comemoração aos 50 anos da escola). TV5, França. Este programa de televisão foi extinto em 16.12.2003, tendo sido retiradas da internet recentemente as suas transcrições.

¹¹¹O casal Detoef organizou a escola com Cécile nos anos 1951–1955, 1957 e 1959. Cf. carta de Cécile DeWitt “aux anciens élèves et professeurs de l’École d’Êtè du (*sic*) Physique Théorique aux Houches”, s/d. RP, 7-4-2.

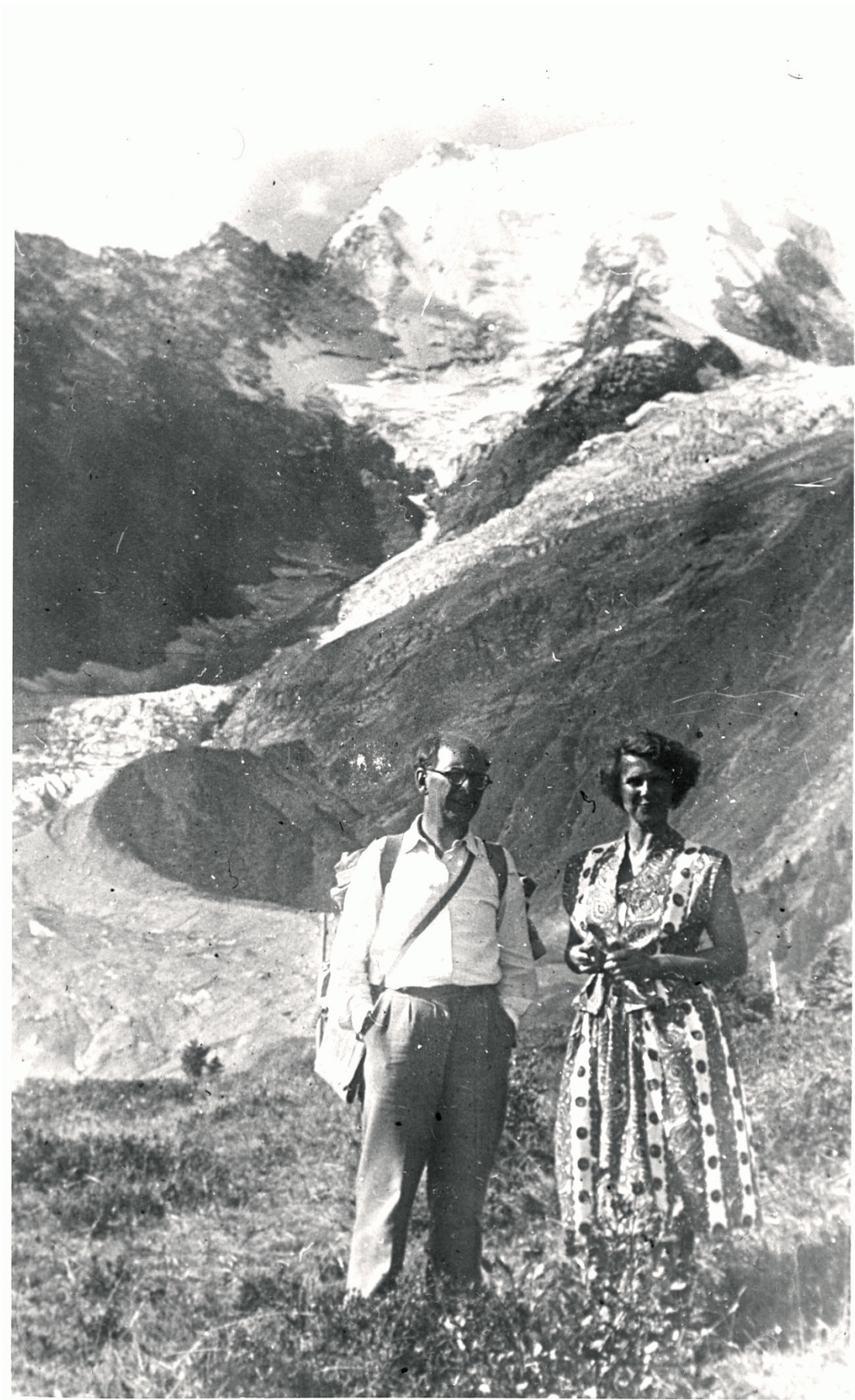


Figura 3.7: Léon & Yvonne Rosenfeld em Chamonix, verão de 1952, por René Reulos. RP, 7-4-2.

vido à sua eficiência, que se soma [à nossa gratidão por] toda a gentileza que ela teve com cada um de nós durante a sua estada em Les Houches.¹¹²

Rosenfeld não somente ajudou na construção da biblioteca, socorreu Cécile quando ela precisou de palestrantes renomados, lecionou duas vezes na escola e ajudou, junto a Yvonne, no cuidado de Nicolette. Ele também tomou a defesa da escola no campo político.

Nos seus primeiros anos, a Escola de Les Houches encontrou uma forte resistência advinda da esquerda francesa.¹¹³ A editora La Nouvelle Critique, ligada ao Partido Comunista Francês, publicou, em 1953, um longo panfleto intitulado “Um plano dos Estados Unidos de tomada da ciência francesa”, no qual denunciava, com base em um relatório interno do governo norte-americano, diversas atividades que fariam parte de um grande projeto dos Estados Unidos de controle da ciência em lugares estratégicos do mundo.¹¹⁴ O texto começava afirmando:

O subsecretário de Estado Sr. James E. Webb solicitou (...) a realização de um relatório sobre aquilo que deveria ser a política internacional americana no que se refere a assuntos científicos, sobre os seus motivos, seus objetivos e seus métodos. (...) Este relatório foi publicado (...) em maio de 1950 (...) sob o título *Science and Foreign Relations*. Este volumoso documento é muito interessante: ao lado das inevitáveis passagens consagradas à “liberdade ocidental”, às “trocas culturais internacionais entre cientistas” e à “segurança do mundo livre”, nós percebemos, ao ler o texto à luz dos fatos que esclarecem as suas implicações, que se trata de um verdadeiro plano do imperialismo americano sobre a ciência, um plano que visa o controle e a tomada (*mainmise*) da pesquisa científica em todo o mundo. Isto não é um exagero, conforme vamos nos esforçar para mostrar aqui com alguns exemplos. (...) Este plano (...) busca ganhar a confiança de cientistas honestos nos Estados Unidos e em todos os países, e deles abusar, ao se aproveitar dos seus desejos sinceros de cooperação e de trocas culturais.¹¹⁵

¹¹²Carta de M.S. Detoef para Léon Rosenfeld, 19.06.1957. RP, 7-4-2. Nesta carta, Detoef faz um jogo de significados que não temos como compreender, colocando Yvonne primeiro entre aspas e depois sem aspas. Podemos crer, pelo contexto geral da carta, que ela é, de fato, um elogio a Yvonne Rosenfeld, ainda que com alguma ironia que nos foge.

¹¹³Cf. as falas de Bernard Jacrot e de Cécile Morette-DeWitt em Archimède, TV5, *op. cit.* Cf. também entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

¹¹⁴**Un plan USA de mainmise sur la science.** Paris: La Nouvelle Critique, 1953. Cf. também Tournès, Ludovic. **Sciences de l’homme et politique les fondations philanthropique américaines en France au XX^e siècle.** Versão preliminar disponível em halshs-00650461, 10 Dec 2011, em particular pp. 182-183.

¹¹⁵**Un plan USA de mainmise sur la science,** *op. cit.*, pp. 6-7.



Figura 3.8: Yvonne e Léon Rosenfeld, Les Houches, s/d, possivelmente no mesmo dia da figura 3.7. WP, Series I, Box “Co-De”, folder “DeWitt-Morette, Cécile”.

Em seguida, o texto analisa cada uma das atividades que seriam apoiadas pelos Estados Unidos, a fim de mostrar como o Departamento de Estado norte-americano delas se aproveitava.

Nós temos visto surgir, há algum tempo, novos organismos científicos, aparentemente baseados na colaboração internacional. Foi criada em 1951 uma Escola de Física Teórica de verão, em Les Houches. (...) Cientistas (*savants*) eminentes de diferentes países, entre os quais muitos americanos, ensinam lá durante algumas semanas cada verão. (...) A anfitriã desta escola é a franco-americana C. Morette-de Witt. (...) A qualidade científica da escola é inquestionável e, em geral, o seu ensino, moderno e vibrante, é interessante. Porém, nas condições presentes, (...) [e considerando] a participação de adidos científicos americanos,¹¹⁶ esta instituição se apresenta como parte integrante de uma tentativa de criar, paralelamente ao ensino nacional [francês], que no momento é particularmente insuficiente neste domínio [da física teórica]

¹¹⁶Dos quais o documento fala nas pp. 21-37.

(por que o ministério de educação nacional se recusa, por exemplo, a criar o Instituto francês de física teórica proposto por Louis de Broglie?), um ensino sob influência americana.¹¹⁷

E complementava,

Isto sem nos esquecermos da possibilidade, devido à presença do adido científico americano [na escola], do enriquecimento dos dossiês do Departamento de Estado [dos Estados Unidos, com informações sobre] o estado dos pesquisadores e das suas próprias personalidades.¹¹⁸

Um interessante episódio ocorreu em consequência deste panfleto. Nos cinco primeiros anos da escola, foram recebidas candidaturas de alunos de todos os grandes centros de pesquisa em física do mundo, com a exceção da Polônia.¹¹⁹ Em 1955, após uma pesquisa junto a conhecidos, Cécile descobriu que Leopold Infeld, o mais célebre físico polonês, lera o panfleto do partido comunista francês e resolvera boicotar o evento.

O casal DeWitt discutiu a questão e julgaram que somente um outro marxista seria capaz de convencer Infeld a baixar o bloqueio. Eles solicitaram, então, que Rosenfeld interviesse.¹²⁰ Este – numa carta que infelizmente parece estar perdida – escreveu a Infeld explicando quem eram Cécile e Bryce DeWitt, e dizendo que a acusação do panfleto não procedia.¹²¹ Isto foi o suficiente para resolver a questão e, já a partir do ano seguinte, Infeld passou a enviar alunos para a escola.

¹¹⁷ *Ibid.*, pp. 52-54.

¹¹⁸ *Ibid.*, p. 54. O documento menciona o nome do físico Leonard Eyges, cf. *ibid.*, p. 36. Ele realmente compareceu à escola em 1952, constando na lista de professores convidados, com a filiação institucional “Attaché scientifique près l’Ambassade des États-Unis, Paris”, cf. “Liste de Participants [de l’École des Houches] 1951-1967”, *op. cit.*

¹¹⁹ Na lista de alunos que participaram da escola durante 1951-1955, temos os países: África do Sul, Alemanha, Bélgica, Brasil, Canadá, China, Dinamarca, Egito, Estados Unidos, França, Grã-Bretanha, Grécia, Holanda, Índia, Irã, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Noruega, Portugal, Sarre (hoje integrado à Alemanha), Suécia, Suíça, Turquia e Iugoslávia. A lista não é exaustiva no que se refere a candidaturas, uma vez que é possível que candidaturas de outros países tenham sido recebidas e não tenham sido aceitas, não constando, assim, na lista acima. O Brasil enviou em 1952 o aluno Paulo de Toledo, da Universidade de São Paulo (USP). O segundo aluno brasileiro na escola, João Meyer, compareceu somente cinco anos mais tarde, em 1957. Sua filiação institucional consta como sendo C.E.N. Saclay, importante centro de pesquisa nuclear em Saclay, ao sul de Paris. Cf. “Liste de Participants [de l’École des Houches] 1951-1967”, *op. cit.*

¹²⁰ Sobre o posicionamento político de Rosenfeld, cf. Freire Jr, Olival. **Quantum Controversy and Marxism**. Historia Scientiarum (Japão), v. 7, pp. 137-152, 1997. Cf. também Jacobsen, Anja Skaar. **Léon Rosenfeld’s Marxist defense of complementarity**. HSPS, v. 37, supplement, pp. 3–34, 2007, e também *Id.* **The Complementarity Between the Collective and the Individual: Rosenfeld and Cold War History of Science**. Minerva, v. 46, n. 2, pp. 195-214, 2008.

¹²¹ Cf. entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz, 04.08.2011, Austin, Texas, Estados Unidos.

Estes episódios mostram-nos a proximidade existente entre Rosenfeld e o casal DeWitt, que é importante dimensionarmos a fim de compreendermos o impacto em Bryce DeWitt da disputa que ocorrerá entre ele e o físico belga no início dos anos 1960.¹²²

Livermore Radiation Laboratory, Berkeley (1952-1955)

DeWitt não participou da segunda edição da escola de Les Houches, pois optou por ir diretamente de Bombai aos Estados Unidos, a fim de encontrar um trabalho. O período que ele passara na Índia acabou sendo bastante produtivo, mas, devido à distância, afastou-o dos centros de pesquisa nos Estados Unidos. Após alguns meses de busca, tudo que ele conseguiu foi um emprego no Livermore Radiation Laboratory, em Berkeley, onde ele já tinha trabalhado nos anos da guerra.¹²³

DeWitt permaneceu em Berkeley por três anos e meio, até o final de 1955, onde trabalhou com simulações computacionais em hidrodinâmica, participando de algumas das primeiras utilizações de computadores na física e, posteriormente, com cálculos de espalhamento em mecânica quântica.¹²⁴ Ainda que tenha continuado a pesquisar em relatividade geral, tais estudos foram uma atividade periférica, feita nas horas vagas e de modo não remunerado.

Ele tinha quase 30 anos quando chegou em Berkeley em agosto de 1953. Dez anos antes, quando ainda estava na graduação, ele tinha feito uma lista dos principais físicos de todos os tempos – Newton, Bohr, Pauli, Einstein, Schrödinger, Heisenberg – e observou que todos fizeram suas principais descobertas antes de terem trinta anos. Esta parecia ser a idade limite para se dar grandes contribuições à física. Na época, ele chegou a fazer as contas: teria mais onze anos para dar a

¹²²Os episódios que acabamos de narrar também podem nos ajudar a compreender a influência que Rosenfeld tinha na física de sua época, influência esta que os historiadores da física contemporânea lamentavelmente ainda não dimensionam corretamente. É necessário um esforço historiográfico para colocar Rosenfeld em um lugar na narrativa história que seja compatível com o lugar que ele ocupava em sua época. Isto, evidentemente, foge ao escopo desta tese.

¹²³Weinberg, Steven. **Bryce Seligman DeWitt, 1923-2004**, *op. cit.*, p. 6.

¹²⁴O primeiro resultado da pesquisa foi: DeWitt, Bryce. **A Numerical Method for Two-Dimensional Lagrangian Hydrodynamics**. University of California Radiation Laboratory, UCRL-4250, unclassified report, December 10, 1953. DF, box “Articles”, folder homônimo ao artigo. Após este primeiro trabalho, DeWitt conseguiu direcionar a sua pesquisa em Berkeley a problemas de espalhamento em mecânica quântica (não-relativística), escrevendo: DeWitt, Bryce. **The Operator Formalism in Quantum Perturbation Theory** (United States Atomic Energy Commission, Publication n. 2884), não publicado, 1955. Este texto é um livro, com (x+280) pp., que somente foi publicado internamente. Disponível no endereço <http://catalog.hathitrust.org/Record/007292230>. Associado a este texto, foi publicado o breve artigo: DeWitt, Bryce. **State Vector Normalization in Formal Scattering Theory**. PREV, v. 100, n. 3, pp. 905-911, 1955.

sua grande contribuição. Agora, em 1953, tendo finalmente chegado à idade tão esperada, ele estava trabalhando em uma área que não era a que ele queria, e tinha publicado somente dois artigos, os quais, ainda que muito bons, estavam longe de ser revolucionários.¹²⁵

Foi neste contexto que DeWitt ficou sabendo de uma competição de ensaios sobre gravitação promovido pela Gravity Research Foundation, uma fundação criada por Roger W. Babson, um dos mais proeminentes empresários dos Estados Unidos do início do século XX, para estudos sobre o enfraquecimento da gravidade.¹²⁶ O anúncio (reproduzido na próxima página) dizia que

dez prêmios (...) serão dados por nós (...) para os melhores ensaios (...) sobre a possibilidade de se descobrir: (a) algum isolante, refletor ou absorvedor parcial da gravidade, ou (b) alguma liga, ou outra substância, de átomos que possam ser agitados ou rearranjados pela gravidade para liberar calor, ou (c) algum outro método razoável de se abrandar o poder da gravidade.¹²⁷

A ideia de se produzir um mecanismo de anti-gravidade fugia de qualquer pesquisa séria em física e, por isso, o concurso era repleto de charlatões e físicos amadores. No ano anterior, dos 43 candidatos, somente dois tinham doutorado (sendo que nenhum deles tinha um emprego acadêmico) e somente dois estavam vinculados a alguma universidade (aparentemente como alunos).

Não seria de se esperar que DeWitt, com uma carreira acadêmica séria, se inscrevesse num concurso como este. Entretanto, ele o fez. O prêmio de 1000 dólares pode ter sido um atrativo, mas a perspectiva de escrever algo sobre relatividade geral deve ter sido o principal motivo. Obviamente, ele venceu o concurso. Isso fez com que a competição ganhasse prestígio e já no ano seguinte excelentes físicos participaram. Hoje, o concurso, voltado a temas gerais da pesquisa em gravitação, é um dos principais prêmios da comunidade de físicos que estudam relatividade geral.

A estratégia de DeWitt em seu ensaio foi astuta. Ele não podia se propor a discutir métodos de se “abrandar o poder da gravidade”, uma vez que isso deporia contra a sua carreira acadêmica.

¹²⁵Sobre esta listagem, cf. e-mail de Richard Hall para Cécile e Chris DeWitt, 22.04.2005, *op. cit.*

¹²⁶Sobre a sua obsessão pela gravidade, cf. Babson, Roger. **Gravity – Our enemy number one**. Reproduzido em Collins, Harry. *Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 2004, pp. 828-831. Cf. também Howard, Don. **Physics as Theodicy**. In: Murphy, Nancey *et alii* (eds). *Physics and Cosmology: Scientific Perspectives on the Problem of Natural Evil*. Vatican City: Vatican Observatory, 2007, pp. 323-332.

¹²⁷Gravity Foundation. **1953 Awards for Essays on Gravity**, em <http://gravityresearchfoundation.org>.



SIR ISAAC NEWTON

GRAVITY RESEARCH FOUNDATION
NEW BOSTON, N. H.
founded by Roger W. Babson

Operated in connection with the Sir Isaac Newton Library of the Babson Institute

1953
Awards for Essays
on Gravity

In 1953 for our Fifth Year we are offering Ten Awards for short Essays with the following stipulations:

(1) These Awards will be made by us on December 1, 1953 for the best 1500 word essays* on the possibilities of discovering: — (a) some partial insulator, reflector or absorber of gravity, or (b) some alloy, or other substance, the atoms of which can be agitated or rearranged by gravity to throw off heat, or (c) some other reasonable method of harnessing the power of gravity.

In none of the above proposed experiments can outside energy be used.

(2) First Award will be	\$1000.00	Sixth Award will be	\$100.00
Second Award will be	100.00	Seventh Award will be	50.00
Third Award will be	100.00	Eighth Award will be	50.00
Fourth Award will be	100.00	Ninth Award will be	50.00
Fifth Award will be	100.00	Tenth Award will be	50.00

(3) Essays must be received at this office before October 15, 1953. They will be accepted from anyone who is seriously interested in the application of gravity to practical uses for the benefit of humanity.

(4) All essays must be typewritten on paper 11 x 8½ inches, with two carbon copies.

(5) Those who have submitted essays in previous years are free to compete again.

(6) The decision of the Trustees will be final and all essays and copies will become the property of the Foundation.

(7) Only one essay will be accepted from each contestant and this must be written in the English language.

(8) Please write a title covering the area of thought expressed in your essay; and a summary paragraph of 100 words or less on a separate sheet as page one.

(9) Please attach a separate sheet giving a short biographical sketch of yourself for use by the press in case you earn an Award.

Address:

GRAVITY RESEARCH FOUNDATION, NEW BOSTON, N. H.
GEORGE M. RIDEOUT, PRESIDENT

*It may be less than 1500 words; but if more the judges have the right not to accept same.

Por outro lado, se não falasse de nenhum dos temas listados, não teria nenhuma chance de ganhar o prêmio. A solução foi argumentar em defesa de um tema que alegou ser correlato. Assim, após uma introdução à questão do enfraquecimento da gravidade, ele disse:

Estas considerações são o suficiente para permitir se afirmar terminantemente que qualquer ataque frontal ao problema de se abrandar a gravidade pelas linhas [propostas] é uma perda de tempo. De fato, a não ser que o termo “gravidade” seja alargado (*broadened*) a fim de incluir uma variedade muito mais ampla de fenômenos do que os de hoje em dia, pode-se dizer seguramente que todos os projetos de poder-da-gravidade são impossíveis. Tal alargamento de terminologia pode, entretanto, ser logicamente possível, ou até mesmo necessário. Este é o ponto central do meu argumento a seguir.¹²⁸

O “alargamento” que DeWitt defendeu em seguida é exatamente a quantização da gravitação. Ele chegou à linha limítrofe entre a pesquisa séria e a picaretagem, mas não chegou a cruzá-la. A sua argumentação no resto do artigo é absolutamente acadêmica. Ele apresenta a questão geral da quantização da gravitação, os seus prós e contras, e expõe algumas possibilidades de quadro físico para a teoria da relatividade geral. Há algumas ideias do ensaio que vale mencionarmos aqui.

Ao apresentar argumentos contrários à quantização da gravitação, DeWitt afirma que é possível que o campo gravitacional seja o único campo não quantizado.

Pode ser que o campo gravitacional seja o único campo que não é quantizado na Natureza. O campo gravitacional, com os seus fenômenos correlatos, poderia, nestas circunstâncias, constituir o nível clássico final que precisa ser postulado, mesmo na teoria quântica, a fim de se ter uma “teoria quântica da medição” consistente.¹²⁹

A fim de conciliar o aspecto clássico da gravitação com o aspecto quântico das demais interações, DeWitt argumentou:

O campo gravitacional poderia ser produzido não pelo tensor de tensão de todos os outros campos da natureza, mas sim pelo valor esperado deste tensor. Se Ψ denota o vetor de estado

¹²⁸DeWitt, Bryce. **New Directions for Research in the Theory of Gravitation**. Gravity Research Foundation Essay, 1953. DF, box “Articles”, folder homônimo ao artigo. O ensaio de DeWitt tem 7 páginas.

¹²⁹*Ibid.*, pp. 31-32. Aqui há uma nota de rodapé no ensaio na qual DeWitt cita o livro de mecânica quântica: Bohm, David. **Quantum Theory**. New York: Prentice Hall, 1951, capítulo 22.

dos campos quantizados, ele satisfaria uma equação de Schrödinger invariante, da forma

$$i\hbar c \frac{\partial \Psi}{\partial x^\mu} = H_\mu \Psi ,$$

(...) onde ∂x^μ seria um deslocamento “tipo-tempo”.¹³⁰ A densidade hamiltoniana H_μ , é claro, dependeria do tensor métrico $g_{\mu\nu}$ (...) Mas $g_{\mu\nu}$, dependendo do valor esperado do tensor de tensão, dependeria de Ψ e de seu adjunto Ψ^* . Logo, a equação [acima] seria não linear em Ψ e um dos princípios fundamentais da teoria quântica, a saber, o princípio da superposição de estados, seria invalidado.¹³¹

Ou seja, a consideração do campo gravitacional nas equações da física, ainda que clássico, imporá uma alteração na teoria quântica. DeWitt passa então a analisar quais seriam as implicações que isso acarretaria. A sua conclusão é que nada seria alterado, sendo a teoria quântica atual correta em pequenas escalas. Ele diz:

O princípio [da superposição] seria invalidado somente em escalas muito grandes (*for the large*); ele ainda seria verdadeiro no nível quântico [isto é, microscópico]. A dependência de H_μ com relação ao $g_{\mu\nu}$ seria importante somente no nível cósmico. E aqui, o princípio da superposição não teria nenhuma consequência. O universo está em um e somente um estado Ψ^* (*sic*). Não existe, até onde sabemos, nenhum acoplamento com forças *fora* do universo que pudessem causar uma transição do universo para um estado diferente. O vetor de estado Ψ [do universo] satisfaz o tempo inteiro a equação [acima].¹³²

Este raciocínio de DeWitt é muito interessante. Primeiro, ele considera que a teoria quântica padrão seria somente um caso particular de uma teoria mais geral, tendo sua aplicabilidade prática assegurada, mas não sendo a explicação última para a teoria quântica. Segundo, ele propõe a ideia de que a equação de Schrödinger seria válida para o universo como um todo, sem precisarmos, nesta circunstância, de nenhum postulado de medição, dado que não há observador fora do universo.

¹³⁰ DeWitt decerto sabia que esta exigência eliminava a covariância da equação. É importante termos em mente o público alvo do ensaio, o que o torna quase um texto de divulgação científica.

¹³¹ *Ibid.*, p. 32.

¹³² *Ibid.*

No fim do ensaio, DeWitt conta no que ele está trabalhando no momento, a saber, em teorias quânticas de campos em 6 dimensões, das quais 5 são espaciais e 1 temporal, com 2 dimensões espaciais compactificadas.¹³³ Os espinores seriam descritos neste espaço-tempo por meio da formulação do eletromagnetismo em espaços-tempos curvos apresentada em seu artigo com Cécile de 1952. Porém, este projeto não deu certo. Na versão publicada do ensaio, algum tempo depois do prêmio ser concedido, DeWitt adicionou uma nota de rodapé dizendo que a sua ideia conduzia a resultados que contradizem as observações experimentais, levando-o a descartá-la. Mais uma vez ele tinha elaborado um projeto em gravitação que não tinha dado certo.

Ainda que o ensaio não tivesse grandes méritos científicos, abriu diversas portas para DeWitt, conforme veremos mais adiante; antes, vejamos quais foram os novos resultados de teoria quântica de campos pelos quais DeWitt se interessou neste período em que esteve trabalhando com hidrodinâmica em Berkeley.

De volta aos bancos escolares (1954)

Apesar das ideias ousadas apresentadas no ensaio de 1953, DeWitt ainda tinha, nesta época, uma concepção bastante padrão da teoria quântica, conforme pode ser observado nas notas de aula do curso de mecânica quântica por ele lecionado na escola de Les Houches no verão de 1953.¹³⁴

Ou seja, se por um lado ele tinha pensado bastante sobre a questão da quantização da gravitação, por outro lado, ele tinha pensado pouco sobre a própria teoria quântica. Isso mudou drasticamente em 1954, quando ele assistiu, como aluno, a dois cursos de mecânica quântica, um lecionado por Schwinger em Harvard e outro lecionado por Freeman Dyson na escola de Les Houches.

O curso de Schwinger enfocava os seus trabalhos recentes sobre aquilo que ele denominou *o princípio da ação*, o qual afirma que uma variação δS na ação de um sistema produz uma variação

¹³³ Isto significa que elas satisfazem condições de contorno periódicas, com um período muito pequeno, de tal modo que as dimensões compactificadas não sejam percebidas. Esta ideia vem dos trabalhos de Theodor Kaluza e Oskar Klein, e tinha sido reavivada em 1953 por um trabalho de Abraham Pais em Fokker, Adriaan (ed). **Proceedings of the Lorentz Kamerlingh Onnes Memorial Conference**. Leiden University, 22-26 June, 1953. Amsterdam: Physica, 1953. Não tivemos acesso a este trabalho de Pais, o qual citamos a partir da referência dada por DeWitt em seu ensaio.

¹³⁴ DeWitt, Bryce. **Quantum mechanics**. Cours de L'École d'Été de Physique Théorique, Les Houches, été 1953. DP, 2-4RM230, folder "Lecture notes". Disponível no endereço <http://repositories.lib.utexas.edu/>. Total de 539 páginas.

$\delta \langle a|b \rangle$ nos processos quânticos associados ao sistema, segundo a equação¹³⁵

$$\delta \langle a | b \rangle = \langle a | \delta S | b \rangle . \quad (3.2)$$

A variação na ação era pensada como advinda da inclusão de uma fonte externa, a qual tinha o papel de simular um acoplamento, gerando assim uma perturbação no sistema. Deste modo, Schwinger conseguia derivar todos os resultados matemáticos da teoria quântica (tanto da mecânica como da teoria de campos), inclusive as funções de Green da teoria (isto é, os propagadores), as integrais de Feynman e todos os cálculos de processos de espalhamento.¹³⁶

O curso de Dyson em Les Houches era bastante similar. Tratava-se de uma repetição de um curso que ele lecionara alguns anos antes em Cornell e cujas notas de aula se tornaram, nesta época, um importante manual que circulava mimeografado entre os físicos teóricos.¹³⁷ Dyson enfocava os mesmos desenvolvimentos de Schwinger, mas sob um ponto de visto lógico invertido. Em vez de derivar as integrais funcionais do princípio da ação, ele derivava este a partir daquelas.

Nós mostramos como (...) o processo de quantização de Feynman leva ao princípio da ação de Schwinger e como o princípio da ação leva a todas as regras usuais da mecânica quântica. (...) Esta abordagem à teoria quântica de campos [é] mais simples que a velha abordagem, hoje antiquada.¹³⁸

A abordagem antiquada a que Dyson se refere é a abordagem de Feynman, Schwinger e Tomonaga de 1948. Ele complementa: “[O novo método desenvolvido por Schwinger] é relativístico o tempo todo [assim como eram os seus métodos anteriores, porém] é muito mais simples que

¹³⁵Esta equação aparece no artigo Schwinger, Julian. **The Theory of Quantized Fields I**. PREV, v. 82, n. 6, pp. 914-927, 1951. Porém, ela somente chega a toda a sua maturidade no artigo Schwinger, Julian. **On the Green functions of quantized fields. I**. Proceedings of the National Academy of Science (USA), v. 37, pp. 452-455, 1951. Para uma análise histórica deste artigo de Schwinger, cf. Schweber, Silvan. **The sources of Schwinger’s Green’s functions**. Proceedings of the National Academy of Science (USA), v. 102, n. 22, pp. 7783-7788, 2005.

¹³⁶Para uma introdução ao método de se incluir uma fonte externa no cálculo de funções de Green, cf. Hartz Maia, Thiago. **Estudos de teoria quântica de campos com comprimento fundamental**, *op. cit.*, em particular pp. 75-82.

¹³⁷Recentemente este curso foi publicado na forma de livro e o seu conteúdo não perdeu em nada a relevância. Dyson, Freeman. **Advanced Quantum Mechanics**. Organizado por David Derbes. Singapore: World Scientific, 2007.

¹³⁸Dyson, Freeman. **Advanced Quantum Mechanics, Supplement** (2nd edition), agosto de 1954, citação pp. 21-22. Notas datilografadas em DP, 2-4RM232, folder “By Others”. Este texto é um apêndice às notas de aula do curso “Advanced Quantum Mechanics” lecionado por Dyson na École de Les Houches em 1954.

os velhos métodos. Ele é baseado no Princípio da Ação da mecânica clássica e não na forma hamiltoniana [da física clássica].”¹³⁹

Estes cursos foram as grandes referências de DeWitt. Ele chegou a mencionar esta importância,

Em 1954 (...) [eu presenciei] Schwinger [dar em Harvard] uma maratona de aulas, por um total de onze horas. Sete em um dia e quatro no outro. Seguindo o costume que eu tinha adotado [quando era aluno] em Harvard, eu escrevi cada equação que Schwinger escreveu no quadro. Tudo era extremamente formal, mas extremamente bonito para mim. Posso dizer que esta maratona de aulas teve um enorme impacto em mim e tem afetado a minha pesquisa desde então, até hoje [1984].¹⁴⁰

Ainda que DeWitt reconheça a importância dos dois cursos, ele não dá a real dimensão do impacto que tais cursos tiveram sobre ele. Podemos listar seis ideias presentes nestes cursos que vieram a se tornar ideias centrais no pensamento de DeWitt nos anos seguintes.¹⁴¹

1. Schwinger discorre extensamente sobre o fato do princípio da ação ser covariante. Isto era, para ele, um ponto fundamental.¹⁴² Tal argumentação reafirmou para DeWitt a importância absoluta da covariância do formalismo. Formalismos que não eram explicitamente covariantes não eram aceitos como válidos. Em particular, o formalismo hamiltoniano da teoria da relatividade geral não era adequado para a quantização, uma vez que ele empregava a quantização canônica, a qual separa a coordenada temporal das coordenadas espaciais, quantizando somente estas. A fim de respeitar a covariância do sistema físico, era necessário realizar, tal como fez Schwinger, uma quantização que respeitasse a covariância.

Por conta desta influência de Schwinger, DeWitt perdeu, alguns anos mais tarde, o interesse nos trabalhos de Dirac, Bergmann, Schild e Pirani sobre a quantização da relatividade geral

¹³⁹Dyson. *Advanced Quantum Mechanics*, *op. cit.*, p. 51.

¹⁴⁰Entrevista de DeWitt para Schweber, 15.08.1984. Citado em SQED, p. 370.

¹⁴¹Um sétimo ponto poderia ser adicionado à lista, a saber, o cuidado de tratar bósons e férmions em pé de igualdade. Esta influência realmente existiu, cf. observa TPQG, p. 53 e p. 107. Não listamos este ponto abaixo, pois isto não tem nenhuma relevância para o que discutiremos no decorrer do capítulo.

¹⁴²Schwinger. *The Theory of Quantized Fields I*, *op. cit.*, em particular pp. 916-926.

em sua forma hamiltoniana, e passa a buscar um caminho para a quantização da relatividade geral que seja covariante.

2. O princípio da ação se propunha a ser uma equação fundamental da teoria quântica, da qual o formalismo padrão pudesse ser derivado. Assim, ficava evidente que o formalismo padrão (devido a Heisenberg, Dirac e outros) não era necessariamente a última palavra acerca da teoria quântica. A partir daqui, DeWitt passa a considerar a possibilidade da quantização da gravitação ter que passar por uma reformulação do formalismo da teoria quântica. Ou seja, que talvez fosse necessário se repensar a própria teoria quântica, para então se formular uma teoria quântica da gravitação. Isto poderia permitir que a teoria quântica fosse posta em um formato covariante, permitindo assim que o ponto (1) acima fosse implementado.
3. Na quantização canônica, parte-se da teoria clássica para então trocar as grandezas dinâmicas por operadores, obtendo uma teoria quântica. Com o princípio da ação, Schwinger era capaz de derivar diretamente da ação toda a dinâmica quântica, sem precisar partir de uma teoria clássica a ser quantizada. Com isto, ele estabelece uma emancipação da física quântica com relação à física clássica.

Como ele explica, “o princípio da correspondência, base convencional da dinâmica quântica, é aqui substituído por um princípio dinâmico quântico auto-contido a partir do qual as equações de movimento e as relações de comutação podem ser deduzidos”.¹⁴³

A mecânica quântica se desenvolveu historicamente como um conjunto de “regras de quantização” superpostas à estrutura da mecânica clássica. Tendo em vista que as leis da física clássica são somente leis [válidas em certos] limites, parece recomendável construir uma teoria quântica auto-contida. Os desenvolvimentos da dinâmica quântica que serão delineados (...) a seguir serão paralelos ao princípio da ação de Hamilton, mas não se basearão nele.¹⁴⁴

¹⁴³Schwinger. **The Theory of Quantized Fields I**, *op. cit.*, citação p. 914.

¹⁴⁴Schwinger, Julian. **Quantum dynamics, part I**. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. December 19, 1952. Cópia em DP, 3-4RM174, folder “Schwinger, Julian”. Estas notas de aula de 1952, enviadas por Schwinger a DeWitt em um formato de *pre-print*, somente foram publicadas no final da década de 1950. O tema das aulas não é exatamente o princípio da ação, mas sim o que Schwinger denominou *álgebras de medição*. Tanto o princípio da ação como as álgebras de medição têm o objetivo de formular a teoria quântica sem auxílio da teoria

Anos mais tarde, ele formulou uma forte imagem a fim de explicar o ponto central de seu argumento: “a introdução de variações de operadores corta o cordão umbilical do princípio da correspondência e traz a mecânica quântica à sua maturidade”.¹⁴⁵

Com o princípio da ação, Schwinger mostra que não é necessário que a teoria quântica venha de uma teoria clássica. DeWitt aprende então que o caminho para uma teoria quântica pode ser independente da teoria clássica. Talvez a teoria quântica da gravitação pudesse surgir dentro do contexto da própria teoria quântica, sem partir da teoria clássica da gravitação.

4. Schwinger – de um modo que não detalharemos aqui – obtém as funções de Green da teoria a partir da variação da ação, a qual é pensada como um acoplamento com um agente externo. DeWitt partirá da mesma ideia que as funções de Green são deriváveis a partir de um acoplamento externo.
5. No curso de Schwinger, as integrais de caminho surgem do princípio da ação. No curso de Dyson, o princípio da ação é deduzido a partir das integrais de caminho. Ambos estão corretos, tratando-se apenas de uma questão de preferência teórica. Dyson parte de um quadro físico, obtendo o formalismo. Schwinger prefere fazer inverso, partindo de um formalismo abstrato e derivando dele um quadro físico. DeWitt vê então as mesmas ideias sob dois pontos de partida, percebendo que o ordenamento lógico de um formalismo pode ser invertido.
6. Ao partir do formalismo abstrato, para somente depois obter um quadro físico, Schwinger assume uma postura muito particular. Como DeWitt certa vez disse,

Schwinger (...) era guiado por uma espécie de intuição, sendo levado pelo próprio formalismo [matemático]. Isto é, o formalismo tomava vida própria e o levava adiante, ainda que [certas vezes o caminho seguido] não parecesse ser completamente legítimo.¹⁴⁶

clássica, ainda que o façam de modo bastante distinto.

¹⁴⁵Schwinger, Julian. *Apud* SQED, p. 355. Cf. também MacKinnon, Edward Michael. *Interpreting Physics: Language and the Classical/Quantum Divide* (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 289). Dordrecht: Springer Verlag, 2012, pp. 144-145.

¹⁴⁶Entrevista de DeWitt para Schweber, 15.08.1984. Citado em SQED, p. 368.

Esta imagem que DeWitt tinha dos trabalhos de Schwinger pode ser questionada,¹⁴⁷ porém nos interessa aqui menos Schwinger e mais DeWitt. Era assim que este entendia o modo de pensar daquele. O formalismo segue adiante, mesmo que não entendamos muito bem o que estamos fazendo e mesmo que não saibamos exatamente como interpretá-lo. A interpretação deve vir depois do formalismo.

Estes seis pontos, todos advindos dos cursos de Schwinger e Dyson, formam o cerne do pensamento de DeWitt após 1954, conforme veremos nas próximas seções. A adesão a tais ideias não foi abrupta. DeWitt ainda refletiu um pouco sobre a quantização canônica da relatividade, mas foi a partir do momento em que ele recusou completamente esse tipo de quantização que ele começou a desenvolver os seus importantes trabalhos que vieram a ser publicados no início da década de 1960.

3.7 A fundação do instituto de pesquisa em Chapel Hill (1955-1957)

Em maio de 1955, Bryce e Cécile DeWitt receberam uma carta de um empresário, de nome Agnew H. Bahnson, propondo financiar uma pesquisa em anti-gravidade. Ele tinha chegado ao casal por sugestão da Gravity Research Foundation, que dera a DeWitt o prêmio em 1953. A sua proposta é que fosse criado, sob os seu apoio financeiro, um grupo de pesquisa junto ao laboratório de física nuclear da State University in Raleigh, pois ele acreditava que o reator nuclear do laboratório poderia ser útil para a pesquisa em anti-gravidade. Bahnson era um leigo e não entendia quase nada acerca de física.¹⁴⁸ Ele esperava que Bryce e Cécile pudessem contribuir para a pesquisa em anti-gravidade, e não entendia o quão absurda era esta expectativa.¹⁴⁹

O casal não levou a sério a proposta, mas John Wheeler, um amigo deles que era professor em Princeton, e que tinha muito mais experiência em obtenção de recursos para pesquisa, escreveu um

¹⁴⁷Cf. por exemplo Mehra & Milton. **Climbing the Mountain**, *op. cit.*, pp. 273-274.

¹⁴⁸A relação entre Bahnson e o casal DeWitt, ainda que amistosa, foi repleta de atritos, conforme pode ser observado na carta de Cécile DeWitt a Agnew Bahnson, 13.05.1959. DF, box “IFP”, sem folder.

¹⁴⁹Carta de Agnew H. Bahnson para Bryce e Cécile DeWitt, 30.05.1955. DF, box “IFP”, folder “IFP Historical”. Reproduzido na íntegra em TPQG, pp. 71-73.

telegrama urgente dizendo: “Não digam não imediatamente para esse cara!”.¹⁵⁰ A oportunidade era imperdível. Bryce e Cécile acabaram aceitando o convite, com a condição de determinarem eles próprios as metas da pesquisa.

Para entender o pedido de Wheeler, é importante lembrar como a pesquisa em gravitação se encontrava marginalizada nesta época. Após os trabalhos de Dirac, Bergmann, Schild e Pirani de 1949 e 1950, nenhum outro resultado relevante tinha sido obtido. Em 1955, ainda não havia uma pesquisa séria em ondas gravitacionais, ainda não tinham sido escritos os inovadores artigos de Arnowitz-Deser-Misner e praticamente não havia conferências sobre relatividade geral.¹⁵¹ DeWitt, de forma bastante dramática, observa:

Vocês não fazem ideia de quão hostil a comunidade de física era, naqueles tempos [1950s], com as pessoas que estudavam relatividade geral. Era pior que a hostilidade que emana atualmente de algumas partes em direção à comunidade de teoria das cordas. Em meados da década de 1950, Sam Goudsmit, então editor-chefe da *Physical Review*, divulgou que um editorial em breve seria publicado avisando que as revistas *Physical Review* e *Physical Review Letters* não mais aceitariam “artigos em gravitação ou em outra teoria fundamental”. Que este editorial não tenha sido divulgado se deve ao trabalho de John Wheeler nos bastidores.¹⁵²

As negociações de Bahnson junto à State University in Raleigh não vingaram e ele acabou negociando com a University of North Carolina in Chapel Hill. No dia 7 de setembro de 1955, foi incorporado ao estado da Carolina do Norte o Institute for Field Physics, tendo Bahnson como presidente e DeWitt como diretor.

Foi deste modo que DeWitt finalmente conseguiu um trabalho ligado à gravitação. É curioso observar que esta posição acadêmica foi-lhe oferecida não por sua trajetória acadêmica, mas exatamente por um ensaio que ele tenha publicado fora da academia. Ter um trabalho estável em uma universidade não significava ter uma obra acadêmica relevante. DeWitt ainda não tinha conseguido progredir em nada na sua busca por uma teoria quântica do campo gravitacional.

¹⁵⁰Cf. Bryce DeWitt em entrevista a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

¹⁵¹Sobre a crise da relatividade geral nos anos 1950, cf. Cf. Eisenstaedt, Jean. **Einstein et la relativité générale**: les chemins de l'espace-temps. Paris: CNRS, 2013.

¹⁵²DeWitt. **Quantum gravity**: yesterday and today, *op. cit.*, citação p. 414.

3.8 A conferência de Chapel Hill (1957)

Como cerimônia de inauguração da instituição, foi organizado em janeiro de 1957, sob o financiamento de Bahnson e da Força Aérea dos Estados Unidos, uma grande conferência internacional intitulada “Conferência Sobre o Papel da Gravidade na Física”.¹⁵³ Por influência de Bahnson, a conferência foi alardeada em inúmeros jornais, por vezes a atrelando à questão da anti-gravidade, o que decerto incomodou muito os DeWitt.

O evento contou com a presença de quase todos os grandes físicos de relatividade geral da época, tais como Bryce e Cécile DeWitt, Peter Bergmann, Hermann Bondi, Valentine Bargmann, Frederik Belinfante, Leopold Infeld, André Lichnerowicz, Felix Pirani, Léon Rosenfeld, Alfred Schild, Marie-Antoinette Tonnelat-Baudot e Louis Witten.¹⁵⁴ Além deles, fizeram parte do evento também um número considerável de físicos que na época não eram conhecidos pelos seus trabalhos em relatividade geral, mas que nos anos seguintes vieram a publicar importantes artigos, tais como Stanley Deser, Robert Dicke, Richard Feynman, Joshua Goldberg, Bertel Laurent, Charles Misner, Joseph Weber, Helmut Salecker e Ryoyu Utiyama, entre outros.

Bryce DeWitt, além de organizar com Cécile o evento, também apresentou um trabalho, intitulado “Gravodinâmica Quântica”. Após os cursos de Schwinger e Dyson, ele passou a se opor completamente à quantização canônica, pois não aceitava mais tratar de modo diferente as coordenadas espaciais e a coordenada temporal. Com isso, ele tinha abandonado as esperanças na formulação Hamiltoniana da relatividade geral e buscava, então, um novo modo de quantizar a gravitação que fosse explicitamente covariante. A ânsia por um novo método, diferente dos então existentes, já aparece no nome do trabalho: uma nova palavra, gravidinâmica, caracterizava os anseios teóricos em busca de algo radicalmente novo.

Cécile DeWitt deambulou pelo evento carregando um grande gravador de fita magnética, que

¹⁵³Sobre o apoio das forças aéreas à conferência de 1957, cf. Goldberg, Joshua. **US Air Force Support of General Relativity: 1956-1972**. In: J. Eisenstaedt & A. J. Kox (ed). *Studies in the History of General Relativity* (Einstein Studies, v. 3). Boston: Birkhaeuser, 1992, pp. 89-102.

¹⁵⁴Talvez a única exceção tenha sido o francês André Mercier. Para uma história desta conferência, cf. Rickles, Dean. **The Chapel Hill Conference in Context**. In: C. Morette-DeWitt & D. Rickles. *The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference*. Berlin: Open Access, 2011, pp. 7-21.

usou para gravar todas as falas, discussões e até mesmo as conversas informais do evento. Depois, ela as transcreveu, produzindo assim os anais do evento, que foram publicados como um relatório interno das Forças Aéreas norte-americanas.¹⁵⁵ Este texto circulou de modo muito limitado na comunidade de física. A fim de divulgar de modo mais efetivo o evento, Bryce DeWitt conseguiu que os trabalhos do evento fossem publicados no jornal *Reviews of Modern Physics*.¹⁵⁶ Este volume foi organizado após a conferência. Os DeWitt solicitaram a todos aqueles que participaram da conferência que enviassem artigos relativos aos trabalhos que apresentaram no evento.

Neste volume, DeWitt renomeou a sua apresentação por “Teoria dinâmica em espaços curvos. I. Uma revisão dos princípios da ação clássica e quântica”. Conforme o nome indica, este artigo pretendia ser o primeiro de uma série. A introdução desta primeira parte é bastante pretenciosa.

Este artigo é o primeiro de uma série que está sendo planejada e será publicada em vários jornais, que será voltada a estender a teoria quântica ao contexto mais amplo da relatividade geral. O programa que eventualmente temos em vista se divide naturalmente em quatro partes: (1) Estudo e desenvolvimento de uma série de aspectos em geral negligenciados da mecânica quântica padrão que precisam ser considerados quando enfocamos os aspectos *não-lineares* advindos da estrutura métrica do espaço de configuração de uma determinada classe de sistemas. (2) Especialização nos membros dessa classe geral nos quais a geometria covariante específica de um contínuo quadri-dimensional tem um papel central. (3) Levar a cabo uma reformulação da teoria “tradicional”, na qual os aspectos específicos da relatividade geral se tornem proeminentemente evidenciados. (4) Um estudo de sistemas em interação, incluindo aqueles do tipo fermiônico que não possuem análogos clássicos, no contexto da relatividade geral. Nas seções seguintes, um primeiro passo é feito na primeira destas quatro partes.¹⁵⁷

A introdução do texto de DeWitt é truncada e obscura. O que ele quis dizer pelo ponto (1) é simplesmente que ele começará a série de artigos estudando a mecânica quântica padrão em

¹⁵⁵Morette-DeWitt, Cécile (ed). **Conference on the Role of Gravitation in Physics**. WADC Technical Report 57-216. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1957. Recentemente republicado em Morette-DeWitt, Cécile & Rickles, Dean. **The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference**. Berlin: Open Access, 2011.

¹⁵⁶DeWitt, Bryce. **Papers from the Conference on the Role of Gravitation in Physics Held at the University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, January 18–23, 1957**. ROMP, v. 29, n. 3, p. 351, 1957. Os artigos da conferência estão nas pp. 351–546 deste volume.

¹⁵⁷DeWitt, Bryce. **Dynamical Theory in Curved Spaces. I. A Review of the Classical and Quantum Action Principles**. ROMP, v. 29, n. 3, pp. 377–397, 1957, citação p. 377.

um espaço-tempo curvo. Assim, ele desenvolve, em seu artigo, uma generalização da quantização canônica para espaços-tempos curvos (conta esta que é tomada somente como um primeiro exercício), depois mostra como o princípio da ação de Schwinger se escreve em espaços-tempos curvos e, por fim, mostra como a integração de caminhos de Feynman pode ser generalizada para espaços-tempos curvos.

Este é certamente o melhor artigo de DeWitt publicado até então. A sua argumentação é consideravelmente mais precisa do que nos artigos anteriores, a sua clareza matemática é notável e o seu projeto é audacioso. Porém – é fundamental observar –, não se trata de um texto de quantização da gravitação. A gravitação aqui é clássica. Trata-se de uma teoria quântica *em* espaços-tempos curvos e não uma teoria quântica *de* espaços-tempos curvos. DeWitt alardeia:

A motivação para o programa geral delineado [acima] é, evidentemente, em última instância um desejo de atacar o problema do papel desempenhado pela gravitação no domínio quântico. Nenhum pedido de desculpas será dado por [termos] esta motivação, ainda que, não precisamos dizê-lo, experimentos recentes não têm aqui nenhum papel! Na opinião do autor, é suficiente dizer que o problema está *aí*, como a montanha está para o alpinista.¹⁵⁸

Entretanto, DeWitt não chegou nem sequer perto do seu objetivo. Ele nunca publicou a parte dois desta série de artigos e, com isso, mais um plano seu de como abordar a questão da teoria quântica da gravitação foi abandonado. O motivo pelo qual o projeto não deu certo não pode ser encontrado nos arquivos e, portanto, somente poderíamos especular. Trata-se, provavelmente, do fato de DeWitt ter se voltado a outras abordagens, mais promissoras, conforme veremos em breve.

3.9 A tese de doutorado de Hugh Everett (1957)

John Wheeler compareceu à conferência de Chapel Hill levando consigo cinco alunos de doutorado — Dieter Brill, Frederick Ernst, Richard Lindquist, Charles Misner e Raymond Mjolsness. Outros participantes tinham levado também seus alunos, mas nunca mais do que um ou dois. Quando enviou os artigos dele e de seus alunos para publicação no *Reviews of Modern Physics*,

¹⁵⁸ *Ibid.*

Wheeler incluiu na lista um sexto aluno, que não tinha ido à conferência. O aluno tinha escrito um artigo, como o único autor, e havia, em anexo a este artigo, um artigo de Wheeler em apoio. O aluno chamava-se Hugh Everett e o artigo correspondia à sua tese de doutorado, feita em Princeton sob a supervisão de Wheeler.

Everett propunha a seguinte ideia. A mecânica quântica padrão, na formulação matemática de John von Neumann, supõe que há dois tipos de dinâmica quântica. Uma é válida para sistemas isolados, sendo ditada pela equação de Schrödinger, já a outra é válida para sistemas que estão sendo medidos e é ditada pelo postulado da projeção. Enquanto a primeira é contínua e causal, a segunda é descontínua e acausal. Everett propôs descrever a mecânica quântica de modo unificado, valendo-se somente do primeiro tipo de dinâmica.¹⁵⁹

Para isso, ele descreveu o sistema fechado composto por duas partes que interagem entre si: o sistema a ser medido (sistema S_1) e o aparato de medida (sistema S_2), este último descrito quanticamente. Em uma notação moderna, podemos dizer que o espaço de Hilbert em questão é dado pelo produto tensorial entre os estados do sistema S_1 e os estados do sistema S_2 . Neste espaço, o estado do sistema total (S), após um período de interação, pode ser escrito, utilizando a notação de Dirac, na forma

$$|\Psi\rangle = \sum_s c_s |s\rangle \otimes |\Phi(s)\rangle, \quad (3.3)$$

onde $|s\rangle$ designa os estados do sistema S_1 e $|\Phi(s)\rangle$ os estados do sistema S_2 . Esta expressão significa o seguinte: quando o sistema está no estado com propriedade s , o aparato de medição nos informa o valor s em seu medidor (por exemplo, um ponteiro). Devido ao fato das hamiltonianas de cada parte do sistema não comutarem com a hamiltoniana do sistema completo (que inclui um termo de interação), um sistema composto por duas sub-partes interagentes não se encontra, em geral, em um auto-estado das sub-partes.

Esta expressão (3.3) é, com alguns detalhes que optamos por omitir aqui, a base daquilo que Everett denominou *formulação dos estados relativos da mecânica quântica*. Por vezes se atribui,

¹⁵⁹Para uma apresentação das ideias de Everett, cf. Freitas, Fábio & Freire Jr, Olival. **A formulação dos ‘estados relativos’ da teoria quântica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 2, artigo n. 2307, 2008.

na história da ciência, uma grande importância a esta expressão, como se ela fosse tipicamente um resultado de sua autoria. Entretanto, ela não era nenhuma novidade em 1957, conforme é admitido pelo próprio Everett ao escrever esta equação.¹⁶⁰ Uma expressão similar podia ser encontrada em diversos lugares, até mesmo em alguns livros-texto.¹⁶¹ O importante do artigo de Everett é a interpretação que ele deu para a expressão (3.3).

Ele propôs que esta equação seja interpretada realisticamente. Ou seja, ao invés de ser uma equação que fornece os valores possíveis de serem medidos em um determinado sistema e as suas respectivas probabilidades de ocorrência, a equação descreveria o próprio sistema. Ele diz:

Chegamos assim à seguinte imagem: durante toda uma sequência de processos de observação, há somente um sistema físico representando o observador, ainda que não haja um único *estado* do observador (o que segue da representação de sistemas interagentes). Entretanto, há uma representação em termos de uma *superposição*, da qual cada elemento contém um estado definido do observador e um estado correspondente do sistema. Deste modo, em cada observação subsequente (ou interação), o observador “se divide” em uma certa quantidade de estados diferentes. Cada ramo [desta divisão] representa um resultado diferente da medição (...) Todos os ramos existem simultaneamente na superposição após qualquer dada sequência de observações.¹⁶²

Ao receber este artigo para a edição dos anais da conferência, DeWitt, como uma das suas tarefas de editor, teve que ler o artigo. Impressionado com o resultado, porém ressabiado com as suas implicações ontológicas, DeWitt escreveu uma carta de oito páginas a Wheeler dizendo que aceitava o artigo para publicação, mas que tinha algumas ressalvas a fazer. A sua principal crítica dizia respeito à ideia central do artigo, ou seja, ao que era o ato de medição segundo Everett.

¹⁶⁰Everett, Hugh. “**Relative State**” **Formulation of Quantum Mechanics**. *Reviews of Modern Physics*, v. 29, n. 3, pp. 454-462, 1957, equação p. 456. Neste artigo, Everett escreve a equação (3.1) de um modo um pouco menos evidente, a saber, $\psi^S = \sum_i \xi_i^{S_1} \psi(S_2; \text{rel } S_1)$. Para todos os efeitos, esta expressão é equivalente à expressão (3.1). Vale observar, a notação utilizada aqui é a mesma utilizada por DeWitt e por Lev Landau (ver a próxima nota de rodapé).

¹⁶¹Por exemplo, no livro de Lev Landau, publicado em russo em 1948 e cuja publicação em inglês data de 1958. Landau, Lev & Lifshitz, Evgeny. **Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory**. Oxford: Pergamon Press, 1958. Sobre este livro, vale consultar Hall, Karl. “**Think less about foundations**”: A Short Course on the Course of Theoretical Physics of Landau and Lifshitz. In: D. Kaiser. *Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspective*. Cambridge, US: MIT Press, 2005, pp. 253-286. Esta expressão (3.3) aparece já nos escritos de juventude de Landau, tal como o artigo com Peierls de 1931 discutido no capítulo 2 desta tese.

¹⁶²Everett, Hugh. “**Relative State**” **Formulation of Quantum Mechanics**, *op. cit.*, p. 459.

Everett diz de modo bastante explícito: “[Em] cada observação (...) o estado do observador ‘se divide’ em uma certa quantidade de estados”. A trajetória (...) de um observador físico real, por outro lado, não se divide. Eu posso testemunhar isso a partir de uma introspecção pessoal, assim como você pode. Eu simplesmente não me divido. ¹⁶³

Ou seja, DeWitt tinha se incomodado com a ideia de que a medição, tal qual descrita por Everett, implicaria na ideia que o observador de algum modo se dividiria. Wheeler mostrou a carta a Everett, que respondeu diretamente a DeWitt.

Não se aceita ou se rejeita uma teoria com base no fato de a visão de mundo básica por ela apresentada ser compatível com a experiência cotidiana. Pelo contrário, aceita-se ou rejeita-se [uma teoria] com base no fato de a experiência predita pela teoria estar em concordância com a experiência vivida (*actual experience*). Deixe-me esclarecer melhor este ponto. Uma das críticas básicas levantadas contra a teoria copernicana era que “a mobilidade da terra como um fato físico real é incompatível com a interpretação da natureza [advinda] do senso comum”. (...) Entretanto, [em] uma teoria que envolva o movimento da terra [deve ser possível] deduzir que nenhum movimento será percebido pelos habitantes da terra (tal como foi possível [demonstrar] com a física newtoniana). Portanto, a fim de decidir se uma teoria contradiz, ou não, a nossa experiência, é necessário ver o que a teoria prediz sobre quais serão as nossas experiências. Agora, na sua carta você disse: (...) “Eu simplesmente não me divido”. Eu não posso me conter a lhe perguntar: Você sente o movimento da terra? ¹⁶⁴

Everett considerava que o seu artigo estava suficientemente claro e optou por não alterá-lo, limitando-se a incluir uma nota de rodapé na versão final, na qual disse:

Em resposta a uma versão preliminar deste artigo, alguns correspondentes questionaram acerca da “transição do possível para o atual”, argumentando que na “realidade” não há – como a nossa experiência atesta – tais divisões dos estados dos observadores. Uma vez que este ponto pode ocorrer a outros leitores, o seguinte é oferecido como explicação.

Toda a questão da transição do “possível” para o “atual” é resolvido nesta teoria de um modo muito simples – não há esta transição e nem tampouco é necessário que haja esta transição para que a teoria esteja de acordo com a experiência. Do ponto de vista da teoria, todos

¹⁶³Carta de DeWitt para Wheeler, 07.05.1957. Cópia em EA, também reproduzido digitalmente em EM, 1145.

¹⁶⁴Carta de Everett para DeWitt, 31.05.1957. Cópia em EA, também reproduzido digitalmente em EM, 1132.

os elementos de uma superposição (todos os “ramos”) são “atuais”, nenhum deles é mais “real” que o resto. É desnecessário supor que todos menos um são de algum modo destruídos, uma vez que todos os elementos separados de uma superposição obedecem individualmente a equação de onda com completa indiferença com relação à presença ou ausência (“atual” ou não) de quaisquer outros elementos. Esta total falta de influência de um ramo em outro também implica no fato que nenhum observador jamais estará ciente de qualquer processo de “divisão”.

Argumentos de que a visão de mundo apresentada por esta teoria é contradita pela experiência, por não estarmos cientes de nenhum processo de ramificação, são como a crítica de que a teoria copernicana da mobilidade da terra como um fato físico real é incompatível com a interpretação da natureza segundo o senso comum porque nós não sentimos este movimento. Em ambos os casos os argumentos falham quando é mostrado que a teoria também prediz que as nossas experiências serão da forma que de fato são.¹⁶⁵

DeWitt diz que esta resposta foi um “Touché!”.

Eu li [o artigo de Everett] muito cuidadosamente e tenho uma vívida memória da minha reação. Primeiro, fiquei muito contente que alguém finalmente, depois de tantos anos e de tantos artigos cansativos, tivesse algo novo e revigorante para dizer acerca da interpretação da mecânica quântica. Segundo, eu estava profundamente chocado. Eu estava tão chocado que eu sentei e escrevi o que veio a ser uma carta de onze páginas para Everett, tanto elogiando quanto condenando. A minha condenação consistia em (...) insistir no fato que “eu não me sinto dividindo”. A resposta que obtive de Everett era uma nota para ser adicionada à versão final do artigo. (...) [Ela] foi aceita por mim e apareceu na versão publicada. (...) Sua referência aos anti-copernicanos me deixou sem ter o que dizer a não ser “Touché!”. Sua resposta à minha carta foi sucinta e direta ao ponto. Eu não tinha mais munição para atirar nele.¹⁶⁶

Esta afirmação de DeWitt é correta, mas não diz tudo. Com base nela poderíamos ser levados a crer que ele se deu por convencido. Isso não ocorreu. Ainda que tenha se mostrado simpático às ideias de Everett, DeWitt achou que elas eram irrelevantes. Na sua carta a Wheeler, ele disse:

Parece-me que o filósofo profissional terá uma apreciação pelo trabalho de Everett maior do que o físico mediano, ao menos no presente. Eu digo isso como uma questão de perspectiva,

¹⁶⁵ Everett, Hugh. “**Relative State**” Formulation of Quantum Mechanics, *op. cit.*, pp. 459-460.

¹⁶⁶ DeWitt, Bryce. Referee report on paper “Everett’s Theory and the ‘Many Worlds’ Interpretation”. EM, 1235.

uma vez que parece muito improvável que a física de hoje em dia (incluindo a gravinâmica quântica!) será consideravelmente afetada por este novo ponto de vista.¹⁶⁷

DeWitt passou dez anos sem mencionar o artigo de Everett. Não faltaram oportunidades, mas sim vontade. Ele não via nada que valesse a pena se explorar nas ideias de Everett.

3.10 A grande ideia de DeWitt (1957-1962)

Finda a conferência de Chapel Hill e publicado o volume da *Reviews of Modern Physics*, DeWitt continuava buscando desenvolver uma teoria quântica covariante da gravitação, sem obter sucesso.

Em julho do mesmo ano, dois físicos em Copenhague – Christian Møller, um importante físico teórico da Universidade de Copenhague, e Stanley Deser, um jovem pós-doutorando – propuseram que uma pequena conferência de longa duração fosse organizada na Universidade de Copenhague para discutir a quantização da gravitação. Assim, de 15 de junho a 15 de julho, seis físicos lá se reuniram, a saber, Christian Møller, Oskar Klein, Bryce DeWitt, Stanley Deser, Charles Misner e Bertel Laurent.

O encontro foi financiado, mais uma vez, pelas Força Aérea dos Estados Unidos, o que implicava, como no caso da conferência de Chapel Hill, na necessidade de se escrever um minucioso relatório do que foi discutido. Tal relatório ficou a cargo de DeWitt, que descreveu o encontro da seguinte maneira.

As discussões, sempre muito informais, eram divididas em apresentações nas quais cada palestrante deveria apresentar o seu ponto de vista, como que em uma aula, e em seguida perguntas eram feitas, de modo livre, após as quais cada pesquisador se retirava para pensar por um tempo e depois retomavam a discussão. Tratava-se, de certo modo, de uma escola de verão de pesquisadores para os seus pares.

O mais notável aspecto deste modo de proceder era um grande sentimento de luxo compartilhado pelos participantes – luxo de ter os outros especialistas à disposição, luxo de não ter que

¹⁶⁷Carta de DeWitt para Wheeler, 07.05.1957. Cópia em EA, também reproduzido digitalmente em EM, 1145.

peneirar penosamente as ideias dos demais na literatura publicada, luxo de poder repetir uma questão inúmeras vezes (o que não é possível numa conferência normal) sem ter de entendê-la de primeira, luxo de ter as ideias repetidas com diferentes ênfases e em várias circunstâncias e perspectivas.¹⁶⁸

Os temas da discussão se dividiram em seis partes, a saber: “(1) Teoria da medição, (2) Problemas Topológicos, (3) Quantização [via integrais de caminho] de Feynman, (4) Quantização canônica, (5) Métodos de Aproximação, (6) Alguns Problemas Especiais”.¹⁶⁹ O primeiro tópico é bastante atípico e dificilmente constaria em qualquer lista de discussões sobre as teorias quânticas da gravitação. DeWitt explica,

A questão da mensurabilidade foi levantada em Copenhague pelo professor Møller, que teve algumas longas discussões sobre o tema semanas antes [do evento] com o professor E. P. Wigner em Princeton. Ao abordar o problema da medição, Wigner começou tentando construir o dispositivo de medição mais eficiente permitido pela mecânica quântica. Na teoria da relatividade geral a medição pertinente consiste na determinação de intervalos invariantes entre eventos do espaço-tempo, a qual Wigner mostrou que pode ser feita por meio de relógios¹⁷⁰

(...) O professor Møller citou uma afirmação feita pelo professor Bohr após acabar o seu famoso artigo sobre ‘medição’ com Rosenfeld, a saber, “No decorrer de nosso estudo das limitações na mensurabilidade do campo eletromagnético, nós [Bohr e Rosenfeld] fizemos todos os erros possíveis. Em cada um deles, a fim de nos desvencilharmos, *nós tínhamos que voltar e olhar o formalismo*”. Do ponto de vista do professor Møller, será igualmente necessário, no caso da gravitodinâmica quântica, ter um formalismo válido disponível antes de se fazer qualquer afirmação confiável sobre o problema da medição.¹⁷¹

Este comentário de Møller sobre as suas conversas com Wigner chamou a atenção de DeWitt sobre a possibilidade de usar o artigo de Bohr e Rosenfeld na pesquisa em gravitação quântica.

¹⁶⁸DeWitt, Bryce. **Exploratory Research Session on the Quantization of the Gravitational Field**, at the Institute for Theoretical Physics, Copenhagen, Denmark, June-July 1957. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1957. PC, 8.

¹⁶⁹*Ibid.*

¹⁷⁰Os quais estão restritos por incertezas quânticas. Neste sentido, cf. Hilgevoord, Jan. **Time in quantum mechanics**. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, pp. 301-306, 2002.

¹⁷¹DeWitt, Bryce. **Exploratory Research Session on the Quantization of the Gravitational Field**, *op. cit.* Ênfase nossa.

Seria possível medir campos gravitacionais? Precisamos de relógios como propõe Wigner? Ou precisamos de corpos de prova macroscópicos, como defenderam Bohr e Rosenfeld no caso do eletromagnetismo? Estas perguntas perseguiram DeWitt durante os cinco anos que se seguiram. Como ele certa vez lembrou,

Naquele tempo [por volta de 1960], eu estava lendo o velho trabalho de Bohr e Rosenfeld acerca da mensurabilidade do campo eletromagnético, da consistência daquilo com a teoria quântica e eu me perguntei a questão: “Será que eu posso fazer o mesmo com a gravidade?”¹⁷²

O artigo de Bohr e Rosenfeld era bastante conhecido, sendo mencionado em diversos artigos e livros norte-americanos dos anos 1950.¹⁷³ DeWitt tinha bastante domínio dele, tendo até mesmo, conforme já mencionamos, vertido-o para o inglês durante a sua segunda estada em Bombai. Entretanto, até onde sabemos, ele nunca tinha pensado em usar o artigo de Bohr e Rosenfeld na sua pesquisa em gravitação. Foi então que DeWitt iniciou um estudo atento do artigo de Bohr e Rosenfeld. A postura de DeWitt diante da gravitação quântica, a sua defesa enfática e as suas tentativas frustradas podem ser descritas de maneira muito precisa por um famoso texto do teórico da literatura Edward Said.

Testemunhar um estado lamentável de coisas quando não se está no poder não é, de modo algum, uma atividade monótona e monocromática. Envolve o que Foucault certa vez chamou de "erudição implacável", rastrear fontes alternativas, exumar documentos enterrados, reviver histórias esquecidas (ou abandonadas).¹⁷⁴

Na sua penúria intelectual, repleta de becos sem saída, falsas trilhas, decepções teóricas, DeWitt encontrou no artigo de Bohr e Rosenfeld o seu ponto de apoio. Em meio às incertezas do presente infeliz e de um futuro incerto, o sucesso pretérito serviu como um porto seguro.¹⁷⁵ Erigir Bohr em figura de autoridade é uma operação produtora de sentido para o presente.¹⁷⁶

¹⁷²Bryce DeWitt em entrevista a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

¹⁷³Cf. o capítulo 2 desta tese.

¹⁷⁴Said, Edward. **Representações do intelectual**. São Paulo: Companhia das Letras, 2005, citação p. 17.

¹⁷⁵Guimarães, Manoel Salgado. **Usos da História**: refletindo sobre identidade e sentido. *História em Revista* (Pelotas), v. 6, pp. 21-36, 2000, p. 24.

¹⁷⁶Payen, Pascal. **Les Anciens en figures d'autorité**. In: D. Foucault & P. Payen (eds). *Les autorités: dynamiques et mutations d'une figure de référence à l'antiquité*. Grenoble: Éditions Jérôme Millon, 2007.

Como lembra o também teórico da literatura Paul Valéry,

o futuro, por definição, não possui qualquer imagem. [O passado] lhe fornece os meios de ser pensado. Ele forma para a imaginação um quadro de situações e de catástrofes, uma galeria de ancestrais, um programa de atos, de expressões, de atitudes, de decisões oferecidas a nossa instabilidade e a nossa incerteza e, desta forma, ajuda-nos a tornarmo-nos.¹⁷⁷

Esta postura de DeWitt com relação ao sucesso pretérito é recorrente. Por diversas vezes ele se refere ao passado em seus textos, recordando o quanto aprendemos com as experiências pretéritas e como elas podem ser bons guias na elaboração das teorias atuais. No artigo de 1957, ele disse

O desenvolvimento histórico da física nos ensina uma sugestiva lição [acerca da quantização da gravitação], a saber, que a existência de qualquer estrutura teórica fundamental que estiver longe de ser levada às suas conclusões lógico-matemáticas – por exemplo, a eletrodinâmica pré-lorenziana ou a eletrodinâmica pré-lambiana¹⁷⁸ – é uma situação que tem grandes potencialidades.¹⁷⁹

A esta altura DeWitt já tinha tomado conhecimento dos trabalhos de Everett, mas parece que a postura de levar o formalismo às últimas consequências lógico-matemáticas era uma postura mais geral que simplesmente uma influência de Everett, a qual vinha, primeiramente, do modo como DeWitt entendia os trabalhos de Schwinger.

O desenvolvimento de conceitos fundamentais em física teórica desde 1900 tem sido consideravelmente uma história, de um lado, de uma análise epistemológica do espaço e do tempo

¹⁷⁷Valéry, Paul. **Regards sur le monde actuel et autres essais**. Paris: Gallimard, 1998, *apud* Guimarães. **Usos da História**, *op. cit.*, p. 22. Fizemos uma pequena adaptação da fala de Valéry. Vale lembrar também Michel de Certeau: “[A escrita da história] permite a uma sociedade situar-se, dando-lhe (...) um passado, e abrindo assim um espaço próprio para o presente: “marcar” um passado é dar um lugar à morte, mas também redistribuir o espaço das possibilidades, determinar negativamente aquilo que está por fazer e, conseqüentemente, utilizar a narratividade, que enterra os mortos, como um meio de estabelecer um lugar para os vivos. (...) a recondução (...) do passado, num lugar simbólico, articula-se, aqui, com o trabalho que visa a criar, no presente, um lugar (passado ou futuro) a preencher, um ‘dever-fazer’. A escrita acumula o produto deste trabalho. Através dele, libera o presente sem ter que nomeá-lo. (...) Desta maneira, uma sociedade se dá um presente graças a uma escrita histórica”. Certeau, Michel de. **A escrita da história**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2011, pp. 109-110.

¹⁷⁸Por “pré-lambiana”, DeWitt se referia à eletrodinâmica quântica antes de 1947, quando houve a reviravolta advinda dos trabalhos de Willis Lamb que mencionamos na seção 3.5.

¹⁷⁹DeWitt. **Dynamical Theory in Curved Spaces. I**, *op. cit.*, p. 377.

e, por outro lado, (...) das noções de observação [quântica], medição e indeterminismo. Estes dois aspectos da teoria física têm permanecido claramente separados, apesar da profunda influência que cada um [dos lados] exerceu sobre o outro e da profunda conexão que sem dúvida existe entre eles. Este [trabalho] é uma tentativa de indicar a natureza e as ideias envolvidas no problema de se retirar essa divisão na física.¹⁸⁰

O historiador Manoel Salgado Guimarães observa que “o futuro assim domesticado pela história jamais seria percebido como a realização do novo, mas [sim] como a realização daquilo que já se fazia presente”.¹⁸¹ Deste modo, DeWitt se coloca como parte de uma longa tradição de pesquisa. A grandeza de suas origens o tornava também grande.¹⁸²

Isto serve como uma defesa contra aqueles que alegam que a quantização da gravitação não teria fundamentação empírica, principal crítica que DeWitt recebia de seus pares. Juntar a relatividade geral e a mecânica quântica, segundo DeWitt, é fazer jus à grandiosidade das duas maiores realizações da física do século XX. Ele sabe que muitos foram contra uma das partes e ironicamente se defende “O autor [DeWitt] espera que o fantasma de Einstein o perdoará”.¹⁸³ As referências históricas surgem sempre que a argumentação segue sem maiores justificativas. Neste sentido, a história serve como a estrutura coerciva da teoria.

A expressão “estrutura coerciva” foi introduzida na história da ciência por Peter Galison a fim de explicar a mudança que surgiu no aparecimento da teoria de cordas. Acerca deste episódio histórico ele diz:

No último quarto de século XX, um grupo de teóricos cada vez maior começou a divorciar-se dos experimentadores e a formar uma aliança mais forte com os matemáticos. De uma forma extremamente sumária, poderíamos dizer [que] enquanto nos tempos das teorias [centradas nas] medidas [experimentais] a experiência tinha fornecido a *estrutura coerciva* que os teóricos necessitavam, cabia agora [na teoria de cordas] à matemática fornecer-lhes uma estrutura

¹⁸⁰DeWitt, Bryce. **The quantization of geometry**. In: L. Witten (ed). *Gravitation: an introduction to current research*. New York: John Wiley & Sons, 1962, pp. 266-381, citação p. 266.

¹⁸¹Guimarães. **Usos da História**, *op. cit.*, p. 26.

¹⁸²Cf. Nora, Pierre. **Between Memory and History**. *Representations*, v. 23, pp. 7-25, Spring 1989.

¹⁸³*Ibid.*, p. 370.

com o mesmo fim.¹⁸⁴

DeWitt está neste entre-meio entre a derrocada da antiga aliança entre a física teórica e a física experimental, mas também não dispõe ainda de argumentos matemáticos fortes para justificar a quantização da gravitação. A história aparece aí como aquilo que permite a defesa do seu projeto. Nesta defesa, o artigo de Bohr e Rosenfeld é o seu baluarte.

Voltemos, agora, à leitura que DeWitt fez do artigo de Bohr e Rosenfeld. Ele lembra que

[a leitura do] velho trabalho de Bohr e Rosenfeld (...) levantou imediatamente a questão: “Como construir um observável?” A única coisa que uma teoria como a relatividade geral admitirá como observáveis são invariantes.¹⁸⁵

A ênfase na medição permitiu a DeWitt conciliar a questão da covariância com a questão da quantização. Ele, de pronto, alardeou a sua descoberta em diversos jornais, prestando contas dos desenvolvimentos do seu grupo de pesquisa (ver figura 3.10).

Porém, entre uma boa ideia e resultados sólidos há um longo caminho. DeWitt ficou anos em silêncio e só veio a público com as suas ideias prontas em 1961. Em uma carta ao seu neto, escrita em meados da década de 1990, DeWitt explica o trabalho do físico teórico.

Você pode pensar que os teóricos são preguiçosos, mas eles não o são (ao menos, os bons teóricos não são). Os quebra-cabeças da natureza são por vezes extenuantes. (...) As grandes sacadas da física vieram, em geral, de somente alguns teóricos, os quais ficaram pensando com afino por muitos anos, utilizando ideias matemáticas de modos descaradamente oportunistas e nunca tocando uma peça de equipamento de trabalho além de um lápis ou um computador.¹⁸⁶

Vilkoviski, um grande amigo russo de DeWitt, afirmava que este agia exatamente deste modo, ficando anos em silêncio e aparecendo, de súbito, com centenas de páginas muito profundas es-

¹⁸⁴Galison, Peter. **Culturas etéreas e culturas materiais**. In: F. Gil (ed). *A ciência tal qual se faz*. Lisboa: Edições João Sá da Costa, 1999, pp. 395-414, citação p. 413. Ênfase nossa.

¹⁸⁵Bryce DeWitt em entrevista a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

¹⁸⁶DeWitt. **Why Physics?** *op. cit.*, p. 3.

critas.¹⁸⁷ Foi exatamente assim que aconteceu no final da década de 1950. Os resultados da sua pesquisa que começou em 1957 somente começaram a ser divulgados em 1960 e 1961, sendo que os principais artigos foram publicados somente em 1962.¹⁸⁸

A demora em publicar algo ocorreu pois não era trivial “fazer o mesmo” que Bohr e Rosenfeld, como DeWitt tinha imaginado. Møller, na conferência de Copenhague de 1957, tinha frisado que era necessário ter o formalismo para se guiar por ele nas análises de medição e lembrou que Bohr e Rosenfeld fizeram inúmeros erros na medição. Para saná-los, Bohr e Rosenfeld precisaram do formalismo. Entretanto, DeWitt não dispunha de um formalismo para se guiar. Ademais, Bohr e Rosenfeld – conforme vimos no capítulo 2 – usavam a medição para analisar a consistência do formalismo, segundo o esquema lógico

$$\begin{array}{c}
 [\hat{A}, \hat{B}] = \dots \implies \Delta A \Delta B \geq \dots \\
 \Updownarrow \text{ (comparação) } \\
 \text{medição} \implies \Delta A \Delta B \gtrsim \dots
 \end{array}$$

Não ter um formalismo significava que DeWitt não poderia efetuar uma comparação entre definibilidade das grandezas físicas e as suas possibilidades de medição. Diante dessas diferenças de circunstâncias, ele observou:

¹⁸⁷Cf. Vilkoviski, Gregory. **The Gospel According to DeWitt**. In: S. M. Christensen (ed). *Quantum Theory of Gravity: essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. DeWitt*. Bristol: Adam Hilger, 1984, pp. 169-209.

¹⁸⁸DeWitt, Bryce. **Invariant Commutators for the Quantized Gravitational Field**. *Physical Review Letters*, v. 4, n. 6, pp. 317–320, 1960. DeWitt, Bryce. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups**. *Journal of Mathematical Physics*, v. 2, n. 2, pp. 151-162, 1961. DeWitt, Bryce. **Invariant Commutators for the Quantized Gravitational Field**. In: P. Bergmann. *Recent Developments in General Relativity*. London: Pergamon Press, 1962, pp. 175–189. DeWitt, Bryce. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups. II**. *Anticommuting Fields*. *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, pp. 625–636, 1962. DeWitt, Bryce. **Definition of Commutators via the Uncertainty Principle**. *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, n. 4, 1962. DeWitt, Bryce. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups. III**. *Generalized Schwinger-Feynman Theory*. *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, pp. 1073–1093, 1962. DeWitt, Bryce. **The Quantization of Geometry**. In: M. E. Rose (ed). *Proceedings of the Eastern Theoretical Physics Conference, October 26-27, 1962*. New York: Gordon and Breach, 1963, pp. 353–386. DeWitt. **The Quantization of Geometry**, In: Witten, *op. cit.*. DeWitt, Bryce. **The Quantization of Geometry**. In: L. Infeld (ed). *Proceedings on the Theory of Gravitation, Conference in Warszawa and Jablonna 25–31 July 1962*. Warszawa: Editions Scientifiques de Pologne, 1964, pp. 131–147.

Breakthrough in Gravitational Research

By Howard Myers
Staff Reporter

An important advance in gravitational research has been made by the North Carolina Project of the Institute of Field Physics at Chapel Hill.

The announcement by Agnew H. Bahnson Jr. of Winston-Salem, president of the Institute, referred to the development as a mathematical breakthrough.

The Chapel Hill studies, conducted by Drs. Bryce and Cecile DeWitt, have taken the "pure science" approach to discovering the secrets of gravity. At the present stage of the project, the work deals almost entirely in the complex mathematics of modern physics.

Bahnson observed that the breakthrough is well nigh impossible for the layman to understand or to get excited about, but that it represents a notable achievement for the DeWitts.

Essentially, the development is a mathematical description of gravity that is expected to prove more precise and useful than earlier field equations. The characterizing feature of the new theory is what Dr. Bryce DeWitt terms the "true observables" of the gravitational field.

But Dr. DeWitt makes it clear that this is not a final nor a complete description of the gravitational field, although it is a step that may lead eventually to mathematical descriptions similar in usefulness to those that paved the way in nuclear physics for the development of atomic power.

The importance of the "true observables" as a tool for research is described by Dr. DeWitt as threefold:

1. As a step toward the long-range goal of the Chapel Hill project of relating the "field" mathematics in which gravity is now described to the more useful "quantum" mathematics of nuclear physics.

2. As a means of getting a better understanding of the structure and behavior of matter and energy, since gravity is so intimately associated with both of these. The new theory may therefore



DR. BRYCE DeWITT
... Makes research advance.

prove useful to nuclear scientists.

3. As a beginning toward a useful analysis of gravity itself, out of which could come the possibility of experiments in harnessing gravitational energy — something that is now far-fetched indeed.

In connection with the first of these possibilities, Dr. DeWitt noted in his report to Bahnson that it appears the "true observables" will provide the way for applying quantum mathematics to the Yang-Mills field—this being a special nuclear field theory advanced about four years ago by the Nobel prize-winning physicist, Frank Yang of the Institute for Advanced Study at Princeton, and a collaborator. A graduate student, Bob Brohme, is working with the DeWitts on this quantizing project.

As for obtaining a better analysis of the energy of gravity, Dr. DeWitt made special mention of the work of Professor Christian Moller of Copenhagen, who spent a month at Chapel Hill early this year. Dr. Moller, the report says, has "obtained a much improved definition of gravitational energy."

The project at Chapel Hill was begun two years ago as the prin-

Made at Chapel Hill

cipal program of the Institute of Field Physics, supported by funds raised among the corporate and private members of the Institute by its founder, Bahnson.

The DeWitts, a husband-and-wife team of theoretical physicists, have had charge of the research since the project's beginning.

The following is a somewhat technical definition of the mathematical nature of the "true observables" theory of the DeWitts:

The observables are invariants; that is, they do not depend on the frame of reference in which they are described. Therefore, they have real physical significance. They bear some resemblance to the co-ordinates with which Einstein identified points in space-time in his original theory, but differ in that the Einstein co-ordinates contained extraneous "non-true" observables.

There is a set of six of the true observables for each point

of space-time, which gives rise to four labels by which the point can be uniquely identified. Since the observables on which this identification tag is based have real physical significance and an independent dynamic behavior, it represents the part of the gravitational field theory that should be subjected to quantum laws.

Thus, it singles out the mathematical quantities upon which further calculations in the quantizing project may be based.

Figura 3.10: Jornal Twin City Sentinel, 07.03.1958, p. 20. DP, CONS-Scrapbook. Rediagramado.

[A minha] dívida [para com o artigo de Bohr e Rosenfeld] pode soar surpreendente em certo aspecto, não, decerto, por qualquer diminuição da atual importância deste clássico trabalho, mas porque o seu conteúdo, conforme Bohr e Rosenfeld indicaram repetidamente, foi guiado, em todos os sentidos, pela existência de um formalismo já desenvolvido, ao passo que aqui nós estamos tentando “colocar o carro diante dos bois” – [buscamos] desenvolver o formalismo com o auxílio das ideias da teoria da medição.¹⁸⁹

Se não era possível comparar definibilidade e mensurabilidade, talvez fosse possível utilizar a mensurabilidade para estabelecer a definibilidade. Ou seja, ele propôs que o diagrama acima fosse reescrito na forma

$$\begin{array}{c}
 [\hat{A}, \hat{B}] = \dots \iff \Delta A \Delta B \geq \dots \\
 \uparrow \text{ (implicação)} \\
 \text{medição} \implies \Delta A \Delta B \gtrsim \dots
 \end{array} \tag{3.4}$$

Um campo gravitacional se mede pela sua ação sobre um objeto dotado de massa, que cumpre o papel de corpo de teste. Impondo relações de incerteza a este objeto, deduz-se incertezas na medição do campo gravitacional, que podem ser usadas para definir os comutadores da teoria. Como se mede invariantes, os comutadores relacionam invariantes e portanto a teoria é covariante.

A teoria quântica do campo gravitacional surge assim como uma consequência da aplicação da mecânica quântica aos corpos de teste, conforme explica DeWitt:

As equações de campo são realmente suficientes para determinar todas as propriedades quânticas do sistema. As relações de comutação do campo eletromagnético, por exemplo, são determinadas unicamente por meio da aplicação do princípio da incerteza aos corpos de teste à maneira de Bohr e Rosenfeld.¹⁹⁰

Uma vez que a quantização passa dos corpos de prova para o campo e uma vez que os diferen-

¹⁸⁹DeWitt. **The quantization of geometry**, *op. cit.*, citação pp. 269-270.

¹⁹⁰DeWitt. **Quantum Theory without Electromagnetic Potentials**. *Physical Review*, v. 125, n. 6, pp. 2189-2191, 1962, citação p. 2190. Ênfase no original.

tes tipos de campo da natureza interagem entre si, DeWitt conclui que a quantização de todos os campos é necessária.

A quantização de um determinado sistema implica na quantização de qualquer outro sistema ao qual ele esteja acoplado. Pelo princípio da indução, portanto, é necessário [must] que a teoria quântica seja estendida para todos os sistemas.¹⁹¹

Deste modo, ele conclui: “a motivação para se “quantizar o campo gravitacional” consiste, portanto, somente no fato deste programa ser completamente lógico”.¹⁹² Ao colocar a quantização nestes termos, ele inicia um esforço de impor estruturas coercivas formais, a partir da matemática e não mais a partir da experiência; esforço este que, conforme observou Galison, irá culminar, sob o ponto de vista metodológico, na teoria de cordas.

As heranças de Schwinger no texto de DeWitt são gritantes. Todos os seis pontos que DeWitt aprendeu com Schwinger em 1954 estão presentes nestes seus trabalhos do início dos anos 1960: (1) A teoria é covariante; (2) A quantização da gravitação passa por uma reformulação do como se obtém uma teoria quântica; (3) A teoria quântica é obtida diretamente do formalismo, sem passar por uma teoria clássica *a ser quantizada*; (4) A dinâmica quântica surge como consequência de um acoplamento externo, no caso o acoplamento entre o sistema a ser medido e o corpo de teste; (5) A ordem lógica do formalismo pode ser invertida; (6) O formalismo segue adiante mesmo que não saibamos exatamente a interpretação dos cálculos.

Os artigos publicados no início dos anos 1960 são qualitativamente distintos daqueles apresentados nos anos 1950. DeWitt finalmente fez o que queria: conseguiu chegar a uma teoria quântica do campo gravitacional. A sua teoria tem diversos problemas, dos quais não falaremos aqui a fim de evitar tecnicidades, que fazem com que este seu trabalho não possa ser considerado a palavra final da pesquisa em gravitação. Pode, sim, ser considerado a primeira palavra da pesquisa em

¹⁹¹DeWitt. **Definition of Commutators via the Uncertainty Principle**, *op. cit.*, citação p. 619.

¹⁹²*Ibid.* É interessante observar que argumentos que visam demonstrar a necessidade de certos aspectos da teoria não são atípicos nesta época. Em momentos de crise, a atitude dos físicos é tirar de si as responsabilidades, jogando-as para a natureza. Nada pode ser uma “questão de gosto”, como diria Boltzmann. Inúmeros são os exemplos de artigos desta época que apresentam argumentos de necessidade. Boa parte da literatura da época busca mostrar que o *gráviton* precisa ter spin 2, precisa ter massa nula, que a equação de Einstein é necessária etc.

teorias quânticas covariantes da gravitação. Se DeWitt for chamado – como disse Smolin – de “o pai da pesquisa séria em gravitação quântica”, foi nesses artigos dos anos 1960 que a paternidade se deu.

3.11 O confronto com Rosenfeld (1962-1965)

[Bohr, de pé, começou a me explicar a sua filosofia, dando voltas em torno de mim, por vezes indo bastante longe.] Uma vez que eu tinha que apurar o meu ouvido ao máximo para escutar as palavras do mestre, eu era obrigado a executar rotações contínuas [em torno de mim mesmo]. O verdadeiro propósito da cerimônia, entretanto, não me ocorreu até o momento em que Bohr concluiu [a sua fala] enfatizando que você não pode ter sequer um vislumbre da complementaridade se você não se sentir completamente tonto.

Léon Rosenfeld¹⁹³

DeWitt imaginava que estava reformulando de modo lícito as ideias de Bohr e Rosenfeld, tanto que resolveu lhes escrever relatando os seus resultados. Para Bohr, disse

Caro Professor Bohr, o *preprint* em anexo sobre “A Quantização da Geometria” contém diversas seções que tratam intensamente do seu clássico artigo com Rosenfeld sobre os problemas de mensurabilidade na eletrodinâmica quântica. Espero não ter violentado as suas ideias no presente trabalho. Se você vier a sentir que ele contém partes que precisam ser corrigidas a tal ponto que mereçam uma crítica direta de sua parte, não preciso dizer que tais críticas seriam recebidas gratamente.¹⁹⁴

Para Rosenfeld, escreveu

Caro Professor Rosenfeld, eu acredito que o *preprint* em anexo contém um material que você

¹⁹³Rosenfeld, Léon. **My Initiation**. In: R. L. Weber & E. Mendoza (ed). A random walk in science. London: Institute of Physics Publishing, 1999, pp. 80-83, citação pp. 82-83. Reproduzido em RP, pp. xxxi-xxxiv. Este texto é uma versão condensada do original publicado como **My Initiation (paraphysical recollections)**. Journal of Jocular Physics (Institute of Theoretical Physics, Copenhagen), v. 2, p. 7, Outubro de 1945. Não tivemos acesso a esta última publicação. Sobre o Journal of Jocular Physics, cf. Halpern, Paul. **Quantum Humor: The Playful Side of Physics at Bohr’s Institute for Theoretical Physics**. Physics in Perspective, v. 14, n. 3, pp. 279-299, 2012.

¹⁹⁴Carta de DeWitt para Bohr, 11.01.1961. BS, 71.

achará divertido. Se você se sentir compelido a fazer comentários escritos (quanto mais críticos melhor) sobre qualquer porção [do texto], eu estaria certamente contente em recebê-los.¹⁹⁵

Podemos crer que DeWitt esperava uma resposta amistosa dos dois físicos.¹⁹⁶ Em particular, ele esperava que Rosenfeld fosse ficar contente em ver uma sofisticada teoria quântica da gravitação, esforço este que, conforme DeWitt reconhecia em seus textos, tinha sido iniciado pelo físico belga. Entretanto, Rosenfeld há muito não acreditava que a gravitação devesse ser quantizada.

Ao receber um convite do físico inglês Hermann Bondi para apresentar um seminário de meia hora com uma revisão da pesquisa sobre gravitação quântica, Rosenfeld respondeu:

Caro Bondi, muito obrigado pela sua gentil carta de 30 de outubro. Penso que eu poderia fazer um revisão sobre a quantização da gravitação muito mais breve que 30 minutos. O texto completo seria: *Et ego censeo gravitaten non quantificandam esse*, ou palavras vernaculares com o mesmo efeito. Piadas à parte, receio que, apesar da tentação de ceder a injustificáveis gastos na Metrópole [Londres], eu serei forçado desta vez a resistir [à tentação].¹⁹⁷

Bondi não poderia prever esta resposta. DeWitt, ainda que conhecesse melhor Rosenfeld, também se surpreendeu com o modo como Rosenfeld se opôs aos seus trabalhos.

A primeira vez que DeWitt apresentou as suas ideias em público foi em julho de 1962, em Jablonna, na Polônia, em um congresso organizado por Leopold Infeld. Ao final do longo seminário de DeWitt, no qual ele analisou como obter os comutadores da teoria quântica da gravitação a partir da análise de medição, demonstrando por fim a necessidade da quantização, Rosenfeld, que estava na platéia, pediu a palavra e disse:¹⁹⁸

Em sua exposição extraordinariamente clara e completa da perspectiva presente acerca da estrutura lógica do processo de quantização de campos, o professor DeWitt casualmente afirmou

¹⁹⁵Carta de DeWitt para Rosenfeld, 11.01.1961. RP, 8-11-6.

¹⁹⁶Infelizmente, não há nenhum documento nos arquivos deles que nos indique qual foi o tom da resposta de Bohr e Rosenfeld.

¹⁹⁷Carta de Rosenfeld para Bondi, 07.09.1961. RP, 8-11-6.

¹⁹⁸O debate foi gravado, de tal modo que citamos aqui a transcrição da fala de Rosenfeld.

que a partir desta perspectiva o campo gravitacional “precisa” (*must*) ser quantizado. Esta pequena palavra “precisa” motivou-me às seguintes considerações, sugerindo que a defesa da quantização do campo gravitacional talvez não seja tão óbvia quanto às vezes se faz crer.¹⁹⁹

Afirmar que a necessidade da quantização tinha sido afirmada “casualmente” foi uma grande ironia de Rosenfeld, uma vez que esta afirmação era um dos principais resultados de DeWitt. A fala prosseguiu:

Tendo em vista a universalidade do quantum de ação, somos tentados a pensar qualquer teoria clássica como caso limite de uma teoria quântica. Entretanto, não se deve perder de vista o fato que a formulação de qualquer teoria (...) envolve a especificação de um sistema em consideração e de condições externas com as quais ele é investigado. Tal especificação, que representa a relação essencial entre a descrição teórica e a observação física, é necessariamente expressa em termos de conceitos clássicos. Este ponto trivial tem uma influência sobre o problema mencionado por DeWitt (...) [a saber,] a análise do processo de medição de grandezas de campo inteiramente em termos da teoria quântica, isto é, por meio de uma inclusão do arranjo experimental na descrição quântica.²⁰⁰

Rosenfeld discordava da descrição quântica do aparato de medida, ou seja, da carga de teste. Ao descrevê-la quanticamente, DeWitt retirava dela a sua função de aparato de medida, uma vez que ela não mais teria propriedades clássicas bem definidas, sendo inútil para se realizar medições. A crítica continua:

Esta análise quântica do processo de medição (que sem dúvida é possível) é, na verdade, sem sentido (exceto na medida em que proporcionaria uma verificação bastante trivial da consistência da teoria quântica), uma vez que somente obscureceria a função essencial do arranjo experimental em estabelecer a conexão entre o sistema quântico e os conceitos clássicos indispensáveis para sua descrição. A desconsideração desta característica essencial levou a tentativas fúteis de contornar a complementaridade por meio da argumentação que a solução da equação de onda para o sistema total incluindo o arranjo experimental levaria a uma análise unicamente determinada do processo de medição completo.²⁰¹

¹⁹⁹Infeld, Leopold (ed). *Proceedings on the Theory of Gravitation*, Conference in Warszawa and Jablonna 25–31 July 1962. Warszawa: Editions Scientifiques de Pologne, 1964, citação p. 219.

²⁰⁰*Ibid.*

²⁰¹*Ibid.*

Rosenfeld se refere, nas entrelinhas, ao trabalho de Everett, fato este que DeWitt certamente compreendeu. Para Rosenfeld, a descrição quântica do aparato de medida do campo gravitacional incorre no mesmo equívoco que Everett incorrera.

Rosenfeld conclui a sua longa observação dizendo que as incertezas dos campos advêm das flutuações da interação do campo com a carga de teste. Se o campo for quântico, tais flutuações impedem de se medir o campo com precisão absoluta. Se o campo for clássico, não há flutuações e, portanto, o campo pode ser medido com precisão absoluta.

Rosenfeld está correto. Entretanto, conforme Bohr disse, os campos somente podem ser observados por meio de sua ação na matéria, de tal modo que “é impossível decidir se as flutuações do campo já estão presentes no espaço vazio ou se foram criadas pelos corpos de teste”.²⁰² Ou seja, DeWitt também está correto. Um atribui as flutuações ao campo, o outro à carga de teste. Trata-se mais de uma questão de interpretação das flutuações presentes no formalismo do que de uma questão de demonstração matemática. É curioso que uma questão interpretativa tenha tamanha implicação ontológica.

DeWitt não respondeu as críticas de Rosenfeld e a discussão teria acabado aqui, se não fosse a publicação de um livro-texto de Henley e Thirring.²⁰³ Estes autores afirmaram que:

A teoria quântica elementar não é uma teoria consistente quando combinada com a teoria clássica de campos. Foi observado por Bohr e Rosenfeld que inconsistências aparecem a não ser que a teoria clássica do campo eletromagnético seja quantizada. Caso isto não seja feito, seria possível, então, violar a relação de incerteza entre a posição e o momento [linear] de uma partícula (por exemplo, um elétron).²⁰⁴

DeWitt tinha proposto utilizar o argumento de Bohr e Rosenfeld para mostrar a necessidade da quantização, sabendo que com isso estava subvertendo as intenções originais dos dois autores, ao passo que Henley e Thirring foram muito além: afirmaram que a necessidade estava demonstrada no artigo de 1933. Isso irritou Rosenfeld a tal ponto que ele resolveu escrever uma resenha do livro,

²⁰²Ver capítulo 2 desta tese, p. 35.

²⁰³Nós mencionamos acerca deste livro no capítulo 2.

²⁰⁴Henley, Ernest & Thirring, Walter. **Elementary quantum field theory**. New York: McGraw-Hill, 1962, p. 3.

a qual foi publicada na prestigiada revista *Nuclear Physics*, cujo editor era o próprio Rosenfeld. Segundo ele, o equívoco dos autores advinha de uma tendência formalista, que enfocava primeiro o formalismo e depois o conteúdo físico. O aspecto quântico de um sistema físico não deveria ser fruto de argumentos formais, mas sim de evidências empíricas.

As críticas acima devem ser suficientes para expor a inanidade de um raciocínio que busca colocar a física de cabeça para baixo. É interessante ter-se ao dispor tais requintadas ferramentas matemáticas que são os atuais métodos da teoria quântica de campos, mas não se deve esquecer que tais métodos foram elaborados com o intuito de descrever situações empíricas específicas, nas quais eles encontram a sua única justificativa. Qualquer questão relativa aos seus limites de aplicação só pode ser respondida pela experiência e não por argumentações formais. Até mesmo a lendária máquina de Chicago não pode fornecer salchichas a não ser que seja abastecida com porcos.²⁰⁵

O ataque de Rosenfeld, conforme veremos, deixou muitas marcas em DeWitt. Uma das citações prediletas de DeWitt era de um romance de Kipling, que versa sobre as consequências imprevistas das ações engendradas: “Tu soltaste uma ação no mundo e, como uma pedra atirada numa piscina, as consequências se espalham sem que tu possas dizer quão longe elas irão.”²⁰⁶ Assim ocorreu com a ação de Rosenfeld. Ao se opor a DeWitt, ele acabou contribuindo para minar a autoridade de Bohr, o que levou o jovem físico a romper, nos anos seguintes, com a interpretação de Copenhague.

A resposta de Rosenfeld fez DeWitt torna-se um heterodoxo sem querer sê-lo. Este nunca assumiu uma postura de confrontação, tendo tirado a palavra “precisa” (*must*) de todos os seus escritos posteriores ao debate, ainda que tenha mantido intacto o seu argumento central. A demonstração das relações de comutação supunha o aparato quântico e dele DeWitt não abriu mão. Nesta disputa, Rosenfeld era o representante de Copenhague, de tal forma que a escolha de DeWitt em manter o aparato quântico significava aceitar a condição de heterodoxo.

²⁰⁵Rosenfeld, Léon. **On quantization of fields**. *Nuclear Physics*, v. 40, pp. 353-356, 1963, citação p. 356. Rosenfeld apresentou, em 1965, uma terceira resposta a DeWitt, Henley e Thirring. Rosenfeld, Léon. **Quantum theory and gravitation**. In: *SPLR*, pp. 599-608.

²⁰⁶Kipling, Rudyard. **Kim**. London: MacMillan, 1950, citação pp. 271-272. Cf. TPQG, p. 79. Original: “Thou hast loosed an Act upon the world, and as a stone thrown into a pool so spread the consequences thou canst not tell how far”.

Edward Said observa que “testemunhar um estado lamentável de coisas (...) envolve também um sentido (...) do insurgente, aproveitando ao máximo as raras oportunidades que se tem de falar, cativando a atenção do público, saindo-se melhor na troca de farpas, no humor e no debate do que os oponentes”.²⁰⁷ A partir de 1962, DeWitt aproveitou brilhantemente cada uma das oportunidades que teve para expor as suas ideias, a começar por um curso de teoria quântica de campos por ele lecionado em Les Houches de 1963. Era a segunda vez que DeWitt lecionava na escola. Mesmo sem afirmar mais que “a gravitação precisa ser quantizada”, podemos observar, neste curso, toda a sua heterodoxia no tratamento quântico do aparato de medida.²⁰⁸

3.12 A trilogia de DeWitt (1965-1967)

Cópias de mim mesmo? 10 ou 500 – isso não me incomoda a mínima!

Bryce DeWitt²⁰⁹

Os trabalhos de DeWitt do início dos anos 1960 culminaram na publicação de três importantes artigos em 1967, que ficaram conhecidos como “a trilogia de DeWitt”, dentre os quais estão os dois trabalhos mais importantes de sua vida.²¹⁰ Concluído em 1964, estes artigos levaram, por diversos motivos, três anos para serem publicados. Com a morte de Agnew Bahnsen, em junho desse ano, e o consequente término do Institute for Field Physics, DeWitt foi transferido para o Departamento de Física da Universidade da Carolina do Norte, o que reduziu significativamente os seus recursos financeiros.²¹¹ No mesmo ano, o seu contrato com a Força Aérea dos Estados

²⁰⁷Said, Edward. **Representações do intelectual**, *op. cit.*, citação p. 17.

²⁰⁸DeWitt, Bryce. **Dynamical Theory of Groups and Fields**. In: C. Morette-DeWitt & B. DeWitt (ed). *Relativity, Groups and Topology*. 1963 Les Houches Lectures. New York: Gordon and Breach, 1964, pp. 587-820.

²⁰⁹Bryce DeWitt em entrevista a Lars Becker-Larsen, 10.04.2003. Transcrição gentilmente cedida pelo entrevistador.

²¹⁰DeWitt, Bryce. **Quantum Theory of Gravity. I.** The Canonical Theory. *PREV*, v. 160, n. 5, pp. 1113–1148, 1967. DeWitt, Bryce. **Quantum Theory of Gravity. II.** The Manifestly Covariant Theory. *PREV*, v. 162, n. 5, pp. 1195-1239, 1967. DeWitt, Bryce. **Quantum Theory of Gravity. III.** Applications of the Covariant Theory. *PREV*, v. 162, n. 5, pp. 1239–1256, 1967. Os dois trabalhos mais importantes são as parte I e II desta trilogia. Estimamos a importância tanto pelo número de citações (a trilogia totaliza 2464 citações) quanto pela classificação de relevância feita pelo próprio DeWitt, cf. TPQG, pp. 131-132.

²¹¹Cf. TPQG, p. 20.

Unidos não foi prorrogado. Naquela época os artigos eram pagos pelos autores e DeWitt não teve como arcar com os custos da publicação.

Os artigos eram uma continuação natural dos seus trabalhos do início da década. Em meio às discussões acerca da quantização do campo gravitacional levadas a cabo na trilogia, ele incluiu uma breve digressão sobre a questão da interpretação da teoria quântica. Este foi o primeiro momento em que DeWitt defendeu a interpretação de Everett.

O ponto de vista de Everett é algo muito natural de se adotar na teoria quântica da gravitação, na qual se está acostumado a falar sem constrangimento da “função de onda do universo”. É possível que o ponto de vista de Everett não seja somente natural, mas essencial.²¹²

O texto sugere a utilização da interpretação de Everett, mas não a defende com afinco. Ela parece razoável quando se trata de interpretar o universo como um todo, mas em momento algum DeWitt alega que ela deva ser utilizada na análise quântica de todos os sistemas.

DeWitt se deixou seduzir pela ideia de uma função de onda universal menos por conta da possibilidade de utilizar a interpretação de Everett e mais por motivos relacionados à sua visão religiosa de mundo. “[A física] é o estudo da natureza. A natureza é tudo que é.”²¹³ Para ele, uma vez que Deus criou tudo que existe e como a física é exatamente o estudo desta criação, então o objeto da física deve ser este todo. A ideia de aplicar os seus conhecimentos ao universo como um todo era, portanto, bastante tentadora. DeWitt tinha clara a relação entre uma função universal e a sua postura religiosa.

Eu nunca senti um conflito entre minha sensibilidade para com a Bíblia do Rei James e minhas crenças como físico. Eu sou um físico teórico e é de conhecimento comum que os físicos teóricos por vezes começam como teólogos amadores. Eles querem compreender a totalidade da realidade e começam pelo estudo da cosmologia – o ponto de início óbvio.²¹⁴

Alguns meses depois de escrever aquela pequena passagem mencionando a interpretação de Everett, DeWitt apresentou uma introdução a esta interpretação em um evento intitulado Battelle

²¹²DeWitt, Bryce. **Quantum Theory of Gravity. I**, *op. cit.*, citação p. 1141.

²¹³DeWitt. **Why Physics?** *op. cit.*, citação p. 1.

²¹⁴DeWitt. **God's Rays**. *op. cit.*, citação p. 33.

Rencontres, organizado por Cecile DeWitt em colaboração com John Wheeler.²¹⁵ Este seminário é o primeiro momento no qual DeWitt defende abertamente a interpretação de Everett, chegando a dizer que a interpretação de Copenhagen deve ser substituída por aquela.

3.13 O rompimento final (1967-1970)

Um homem tem o direito de mudar a sua opinião, não tem?

Bryce DeWitt em carta a Hugh Everett²¹⁶

Os textos que DeWitt publicou sobre Everett em 1967 são bastante significativos, porém tiveram um alcance muito limitado. A trilogia publicada no periódico *Physical Review* dificilmente foi lida por alguém que não fosse estudioso da quantização da gravitação. Já o seminário do Battlle Rencontres foi editado em formato de livro, limitando assim a sua circulação.

A terceira etapa levada a cabo por DeWitt foi escrever um artigo para a *Physics Today*, a revista de maior circulação na comunidade de físicos, que contava na época com uma tiragem de 56 mil exemplares mensais.²¹⁷ O quarto empreendimento de DeWitt em defesa da interpretação de Everett foi lecionar um curso na renomada *Scuola Internazionale di Fisica 'Enrico Fermi'*, em Varenna, na Itália. Este foi o momento no qual DeWitt estabeleceu de modo mais claro, detalhado e sincero a sua adoção da interpretação de Everett. Ao contrário do artigo da *Physics Today*, em Varenna, devido ao perfil do público, ele pôde esmiuçar os detalhes, fazer digressões fundamentais e expor as contas em toda a sua complexidade. Este curso deve, pois, ser tomado como a apresentação mais precisa das suas intenções.

O curso se dividia em duas partes. A primeira era dedicada à interpretação de Everett; a segunda, à generalização feita por DeWitt, em 1962, da argumentação de Bohr e Rosenfeld. Neste

²¹⁵DeWitt, Bryce. **The Everett-Wheeler Interpretation of Quantum Mechanics**. In: C. M. DeWitt & J. A. Wheeler (eds). *Battelle Rencontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*. New York: W.A. Benjamin, 1968, pp. 318-332.

²¹⁶Carta de DeWitt para Everett, 07.05.1974. DF, box "Letter", folder "2001 – Correspondence about Everett + 1974 corresp. with Everett".

²¹⁷DeWitt. **Quantum mechanics and reality**. *Physics Today*, *op. cit.* Sobre a tiragem da *Physics Today*, cf. carta de Goudsmit a Walter de Gruyter et Co., 21.11.1969. GP, 4-12.

texto, os argumentos de Bohr e Rosenfeld se encontram com a interpretação de Everett. A própria estrutura do texto já expõe a tese central do presente capítulo: a profunda correlação existente entre a adoção da interpretação de Everett e a importância dada por DeWitt à questão da medição em mecânica quântica tal qual fora formulada por Bohr e Rosenfeld.

O cerne do raciocínio de DeWitt é o metateorema abaixo.

Sem recorrer a nenhuma metafísica externa, e nem a nenhuma matemática do que aquela das regras padrões da lógica, é possível (...) provar o seguinte memorável metateorema: o formalismo matemático da teoria quântica é capaz de fornecer a sua própria interpretação.²¹⁸

Ou seja, DeWitt, seguindo uma sugestão apresentada no artigo de Everett, passou a defender uma determinação da semântica pela sintaxe das teorias. O formalismo era identificado com a sintaxe e esta determinaria sozinha o conteúdo semântico da teoria, ou seja, a interpretação.

Provas em metamatemática, ou em metafísica, requerem primeiro a introdução de uma sintaxe cuidadosamente construída. [As palavras] “sistema”, “aparato”, “estado”, “observável” (...) [adquirem] conteúdo semântico somente *a posteriori*, após as consequências dos postulados [da teoria quântica] terem sido investigadas [...] Precisão, e portanto sentido, somente será obtida após um exame do simbolismo quântico em um contexto claro e específico, a saber, aquele do processo de medição.²¹⁹

A análise da medição ao modo de Bohr e Rosenfeld tinha a função de derivar do formalismo a interpretação da teoria. A análise de medição, ao expor o conteúdo semântico da mecânica quântica sem fazer referência à mecânica clássica, mostrava como a mecânica quântica superava a mecânica clássica; era possível se fazer física sem os preconceitos clássicos.

A história da mecânica quântica seria sem dúvida muito diferente do que ela é se não fosse pelo fato de muitos sistemas quânticos terem análogos clássicos. [...] A existência prática do domínio clássico tem em larga medida compensado os preconceitos que ela arraiga em nós.²²⁰

²¹⁸DeWitt, Bryce. **The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics**. In: B. d’Espagnat (ed). *Fondamenti di meccanica quantistica: Rendiconti della scuola internazionale di fisica Enrico Fermi*. New York: Academic Press, 1971, pp. 211-262, citação p. 212.

²¹⁹*Ibid.*, citação p. 169.

²²⁰*Ibid.*, citação p. 190.

A quinta etapa levada a cabo por DeWitt foi orientar um aluno, R. Neill Graham, em uma tese de doutorado sobre a interpretação da teoria quântica. DeWitt e Graham editaram um volume com os principais trabalhos acerca da interpretação de Everett e publicaram uma compilação bibliográfica sobre a interpretação da teoria quântica.²²¹

Em 1974, Everett escreveu uma breve carta para DeWitt, na qual ele disse:

Caro Bryce, enquanto mexia na gaveta de baixo da minha mesa de trabalho, encontrei algumas correspondências divertidas. Tendo acabado de comprar uma máquina fotocopadora pessoal, não pude resistir em copiar alguns trechos e mandar para você. Hugh.²²²

Um dos documentos era a carta que DeWitt enviou a Wheeler em 1957 falando do trabalho de Everett. Antes de fotocopiar, este fez duas exclamações ao lado de dois trechos da velha carta. Um deles dizia: “[O vetor de estado do] esquema delineado por Everett (...) contém todos os ramos possíveis ao mesmo tempo. No mundo físico real, precisamos nos contentar com somente um ramo. O mundo de Everett e o mundo real não são, portanto, isomórficos.” As exclamações feitas por Everett mostravam, pois, como tinha sido curioso que DeWitt um dia, em 1957, tenha atacado algo que uma década depois ele próprio passaria a defender. Como resposta, DeWitt escreveu

Caro Hugh, muito obrigado pela sua coletânea de velhas correspondências. Pode te divertir saber que eu preservei cuidadosamente [a minha cópia de] todos os itens que você me enviou.²²³

E referindo-se às exclamações feitas por Everett, complementou: “Um homem tem o direito de mudar a sua opinião, não tem?”²²⁴

DeWitt mudou a sua opinião. Esta mudança não ocorreu entre a sua primeira leitura do texto de Everett e a sua leitura da resposta de Everett, com a famosa menção ao copernicanismo. A

²²¹DeWitt, Bryce & Graham, R. Neill. **Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics**, *op. cit.* DeWitt & Graham. **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**, *op. cit.*

²²²Carta de Everett para DeWitt, 27.04.1974. DF, box “Letter”, folder “2001 – Correspondence about Everett + 1974 corresp. with Everett”.

²²³Carta de DeWitt para Everett, 07.05.1974. DF, box “Letter”, folder “2001 – Correspondence about Everett + 1974 corresp. with Everett”.

²²⁴*Ibid.*

adesão de DeWitt ocorreu entre 1957 e 1967, tendo sido lenta e tortuosa. Envolveu inúmeros fatores, como a sua aproximação com o trabalho de Bohr e Rosenfeld, e a controvérsia com este. O DeWitt defensor da interpretação de Everett de 1967 não é o mesmo DeWitt que leu a nota de rodapé em 1957. Entre este e aquele, uma ruptura inaudita ocorreu: a destruição da autoridade de Copenhague.

3.14 A questão da autoridade de Copenhague

Finda a nossa narrativa, podemos refletir sobre como esta história pode nos ajudar a compreender a questão da autoridade de Copenhague. Certa vez, na década de 1990, DeWitt disse:

Aquele artigo [de Everett] simplesmente se apresenta como algo novo (*like something fresh*) e permite coisas – é um artigo capacitante (*enabling*), no sentido de que ele permite que nos perguntemos questões que nunca tinham ocorrido antes.²²⁵

É curioso observarmos que DeWitt poderia, em 1957, ter dito exatamente a mesma coisa do artigo de Bohr e Rosenfeld. Naquela época, eram Bohr e Rosenfeld que estavam erigidos como figuras de autoridade. A passagem da autoridade de Bohr e Rosenfeld para a autoridade de Everett nos mostra uma mudança nos mapas da credibilidade.²²⁶ As autoridades autorizam uma elaboração comum e, assim, permitem novos começos.²²⁷ É curioso que DeWitt tenha entendido de modo tão intuitivo a essência do conceito de autoridade.

Uma vez derrubada, a autoridade é vista como controle, como perversão. Pouco antes de morrer, DeWitt disse:

Talvez, [Bohr] tenha feito uma lavagem cerebral em uma geração de físicos. Eu acho que Léon Rosenfeld foi tão responsável [quanto Bohr] por isto, mas todos os grandes velhos físicos da quântica (Born, Heisenberg, Pauli), todos eles essencialmente tomaram a linha de Copenhague e era difícil se opor a estas grandes figuras.²²⁸

²²⁵ Bryce DeWitt em entrevista a Kenneth W. Ford, 28.02.1995, OH.

²²⁶ Certeau, Michel de. **A Cultura no Plural**. São Paulo: Papyrus, 2008, citação p. 34.

²²⁷ Payen, Pascal. **Les Anciens en figures d'autorité**, *op. cit.*, p. 8-9.

²²⁸ Bryce DeWitt em entrevista a Lars Becker-Larsen, 10.04.2003. Transcrição gentilmente cedida pelo entrevistador.

E em particular sobre Rosenfeld,

Léon Rosenfeld defendia a interpretação de Copenhague como sendo algo “sagrado”. Nos anos 1950, alguns jovens começaram a pensar na função de onda como não sendo colapsada e Rosenfeld escreveu algumas respostas raivosas. Havia um certo medo entre os jovens em tentar confrontar Bohr com uma abordagem alternativa.²²⁹

A autoridade torna-se tolhedora a partir do momento em que há a possibilidade de ser subvertida.²³⁰

3.15 Crítica da narrativa estabelecida

Dez anos se passaram entre a publicação do artigo de Everett e a sua defesa por DeWitt. A pergunta que se coloca é por que DeWitt levou dez anos para defender Everett? Conforme dissemos no início deste capítulo, há uma narrativa estabelecida sobre esta questão.

A resposta que o próprio DeWitt fornece é a seguinte:

[Eu] recebi uma visita de Max Jammer (...) [que] estava preparando um outro volume sobre os fundamentos da mecânica quântica, tentando trazer os dados históricos até os anos 1960. Fiquei surpreso ao descobrir que Jammer nunca tinha ficado sabendo de Everett. (...) O encontro com Jammer me fez pensar: este rapaz (Everett) está recebendo um tratamento injusto; algo deve ser feito.²³¹

Como consequência deste pensamento, DeWitt teria começado uma campanha em defesa de Everett. Esta narrativa de DeWitt dá a entender que ele concordou com Everett desde o primeiro momento. Assim, esses dez anos não seriam um período de convencimento, mas sim o período que DeWitt levou para externar publicamente sua opinião.

Ademais, a data da visita de Jammer é incerta. Algumas vezes DeWitt disse que foi em 1967, antes da publicação da trilogia e do seminário no Battelle Rencontres. Outras vezes, ele disse que

²²⁹ *Ibid.*

²³⁰ Kojève, Alexandre. **La notion d'autorité**. Paris: Gallimard, 2004, pp. 56-65.

²³¹ DeWitt. **Referee report on “Everett’s theory and the ‘many worlds’ interpretation”**, *op. cit.*, p. 2. TPQG, p. 95.

foi em 1968 e, por vezes, até mesmo em 1969. Se ela tiver ocorrido depois de 1967, não poderia haver uma relação causal entre a visita e os seus primeiros textos em defesa de Everett.

Por mais que o encontro com Jammer tenha tido algum peso nas ações de DeWitt, certamente ele por si só não teria sido o suficiente para DeWitt passar a defender Everett de modo tão veemente. Algo mais aconteceu e nós defendemos aqui que se trata de uma lenta desconstrução da autoridade de Copenhague.

Após a morte de DeWitt, em 2004, Cécile Morette-DeWitt, sua esposa, fez coro à narrativa estabelecida. Em resposta a alguns historiadores que atentaram para esse longo hiato de dez anos, ela afirmou:

Fiquei feliz ao descobrir que Bryce DeWitt apareceu na seção “Este Mês na História da Física” na edição de maio de 2009 da APS News. O artigo é excelente. Infelizmente, ele contém uma afirmação errada que eu tenho tentado retificar por muitos anos – a saber, “irônicamente foi Bryce DeWitt que mudou de ideia”. Na verdade, DeWitt promoveu o trabalho de Everett desde o primeiro instante. Quando John Wheeler pediu que DeWitt lesse a tese de Everett, DeWitt a achou “nova e revigorante”. A sua única reserva, “eu não me sinto dividir”, foi rapidamente dirimida pela resposta de Everett que nós não sentimos a Terra mover. DeWitt imediatamente respondeu “Touché!”. (...) A observação “eu não me sinto dividir” foi [somente] uma rejeição inicial de DeWitt. Estou atualmente editando o livro *The pursuit of quantum gravity*. (...) Eu espero que este livro venha a estabelecer este ponto de uma vez por todas.²³²

Na mesma época, ela escreveu outro sermão:

Peter Byrne afirma que Bryce DeWitt “virou cento e oitenta graus [no que se refere à teoria de Everett] e se tornou o seu mais devoto defensor”, dando assim a entender que antes DeWitt tinha uma opinião negativa da teoria. Na verdade, DeWitt promoveu o trabalho de Everett desde o início. (...) DeWitt decidiu incluir a tese de Everett [no volume que organizou da *Reviews of Modern Physics*] ainda que Everett não tenha comparecido [à conferência de Chapel Hill]. DeWitt leu a tese [de Everett] atendendo a um pedido de John Wheeler, mas Wheeler tinha dúvidas acerca do trabalho, pois este questionava a compreensão de Bohr da mecânica quântica. DeWitt achou [a tese] nova e revigorante. Alguns anos mais tarde, DeWitt

²³²Morette-DeWitt, Cécile. **DeWitt not split on many worlds idea**. APS News, v. 18, n. 9, letters to the editor, 2009.

descobriu que o artigo de Everett tinha “caído no ostracismo” e resolveu iniciar uma campanha pública. Esta campanha não foi uma virada de cento e oitenta graus na sua posição, mas sim a continuação do seu interesse de 1957 no trabalho de Everett. (...) Eu quero corrigir uma apresentação equivocada de um fato histórico.²³³

Conforme vimos, o processo de adesão da interpretação de Everett por parte de DeWitt foi muito mais complexo do que é propalado pela narrativa do “Touché!” e da visita de Max Jammer. Mostramos que em 1957 a relevância do trabalho de Everett foi muito pequena, mesmo para DeWitt. Ele não acreditava que esta teoria pudesse ser de qualquer valia para os físicos e em particular para a gravitação quântica. Em 1957, DeWitt foi tocado pelo argumento de Everett, mas não convencido.

Mostramos que a heterodoxia de DeWitt vem da descrição quântica do aparato de medição, não de Everett, ao passo que a narrativa estabelecida nem sequer menciona a importância do artigo de Bohr e Rosenfeld para DeWitt. Criticamos também a ideia de que a adoção de Everett vem puramente de motivos cosmológicos. Mostramos que os motivos cosmológicos existentes vem não somente da interpretação de Everett, mas também de uma ideia de teoria física marcada por uma forte concepção religiosa.

O mais importante de nossa narrativa, que a distingue completamente da narrativa estabelecida, é ter mostrado que a primeira heterodoxia de DeWitt não foi adotar a interpretação de Everett. O seu rompimento com a interpretação de Copenhague se deu no debate sobre medições de campos quânticos. O que DeWitt fez foi descrever quanticamente o aparato, esta foi a gênese de sua heterodoxia. Que esta descrição depois tenha sido interpretada segundo a interpretação de Everett é somente uma ironia da história.

A narrativa estabelecida é imprecisa em diversos aspectos e somente serve para obscurecer alguns pontos centrais da adoção da interpretação de Everett por DeWitt. O seu principal problema foi colocar em segundo plano a sua pesquisa sobre gravitação quântica, a qual era a sua principal preocupação na época e foi a partir dela que DeWitt se aproximou da interpretação de Everett.

²³³Morette-DeWitt, Cécile. **180 Degrees of Aberration**. Scientific American, letters to the editor, April 10, 2008.

3.16 “A ironia deste capítulo”

Narramos, neste capítulo, os vinte primeiros anos de pesquisa de Bryce DeWitt. Vimos como ela foi marcada pela busca de uma teoria quântica da gravitação e como esta busca foi árdua e penosa. Durante dez anos, DeWitt entrou por becos sem saída e seguiu falsas pistas. Enquanto os outros físicos trabalhavam com a formulação hamiltoniana da gravitação, DeWitt se deparava com os inúmeros percalços da sua exigência por covariância. Sua trajetória mudou drasticamente no final dos anos 1950, quando ele descobriu como usar às avessas o artigo de Bohr e Rosenfeld. Este uso encontrou uma forte oposição de Rosenfeld. Daí em diante, DeWitt foi buscar na interpretação de Everett os seus novos caminhos. A autoridade não era mais Bohr, mas sim Everett.

Nesta história da longa relação de DeWitt com a interpretação de Copenhague, houve oposição, mas também admiração. Inúmeras são as evidências históricas que mostram este sutil jogo entre crítica e adesão. Narrá-lo aqui é fundamental para compreendermos propriamente a adoção final da interpretação de Everett por DeWitt. Deste modo, podemos compreender as complexas relações existentes entre a sua pesquisa em gravitação quântica, a questão da interpretação da teoria quântica e a derrocada da autoridade de Copenhague.

Ainda que tenhamos inúmeras evidências que atestem o que dissemos, não temos nenhuma evidência que nos explique porque toda esta história nunca tinha sido narrada. DeWitt era afeito a reminiscências, gostava de contar as peripécias de sua vida, porém sempre foi muito breve acerca delas. DeWitt era uma pessoa incisiva. Ele tinha palavras doces, mas sempre afiadas, exemplos numerosos, mas sempre pungentes, e histórias divertidas, mas sempre breves. Típica é a sua fala: “a maioria de vocês não tem como saber quão hostil a comunidade de física era naqueles dias com as pessoas que estudavam relatividade geral”.²³⁴ Típica também é a história do “Touché!” e por isso ele sempre a contava.

Quando resolvia falar um pouco mais, ele incluía em sua narrativa a visita de Max Jammer. É curioso observarmos como DeWitt sempre se confundia aqui acerca das datas. Primeiro, disse que Jammer o visitara em 1968, depois, em 1967, por fim, em 1969. A data era imprecisa. Ele dizia

²³⁴DeWitt. **Quantum gravity: yesterday and today**, *op. cit.*, citação p. 414.

“eu tenho uma memória muito vívida da minha reação [ao texto de Everett]” e narrou enfaticamente: “eu fiquei tão chocado [com o trabalho dele] que escrevi uma carta que acabou tendo onze páginas”. A carta tem oito páginas. Quando pediram-lhe, certa vez, que contasse mais detalhes sobre esta história, ele confessou, “é terrível falar destas coisas históricas quando a sua memória é tão ruim”.²³⁵

Ainda que os pormenores desta história tenham se perdido em suas lembranças, a ironia nela contida ele nunca esqueceu. Ao final de sua vida, ao escrever a sua obra maior, um livro-texto de teoria quântica de campos com mais de mil páginas, ele fez questão de incluir discussões tanto sobre a interpretação de Everett, como também sobre a medição nos moldes de Bohr e Rosenfeld. Em certo ponto do texto, em um tom ácido que lhe era típico, ele reconhece que virara as ideias de Bohr e Rosenfeld ponta-cabeça:

A ironia deste capítulo não passará despercebida para alguns leitores. Apesar da análise de Bohr e Rosenfeld ter sido usada para chegarmos à possibilidade de um princípio de incerteza universal (...) ambos Bohr e Rosenfeld teriam repudiado enfaticamente a interpretação, devida a Everett, do formalismo resultante.²³⁶

Esta ironia foi o tema da história que aqui contamos. Caso, ao cabo do nosso relato, ela tenha ficado clara para os leitores desta tese, caso ela tenha arrancado-lhes um riso, um riso daqueles de quem entendeu o quão inesperados podem ser os caminhos da História, teremos cumprido a meta de nossa narrativa.

²³⁵ Audio em DP, 6-4RM232, folder “DeWitt and John Wheeler talking in Mazagón, Spain, audiocassette, 1991”.

²³⁶ DeWitt. *The Global Approach to Quantum Field Theory*, *op. cit.*, p. 144.

Capítulo 4

Conclusões: as heterodoxias quânticas e o olhar do historiador

Podemos agora retomar as questões que formulamos no final do primeiro capítulo. O que faz o historiador quando torna visível uma heterodoxia científica? Qual utensilagem teórica pode ser utilizada nessa análise retrospectiva do rompimento de uma ortodoxia?

A primeira constatação que podemos tirar da história de Bryce DeWitt é que a dinâmica de construção de uma heterodoxia é mais ampla que o rompimento com uma ortodoxia. Se olharmos somente para o seu rompimento com a interpretação de Niels Bohr, temos uma história centrada entre 1967 e 1970. Esse é o período no qual DeWitt alardeia sua oposição a Copenhague. Por outro lado, se olharmos para a construção de sua heterodoxia – que ocorre não nos discursos, mas sim nos modos de usar as idéias de Bohr –, o processo se amplia desde cerca do início dos anos 1950 até 1970. A dinâmica antes do rompimento é tão ou mais importante que o rompimento em si.¹

A oposição de DeWitt à interpretação de Bohr a partir de 1967 é o resultado final da sua

¹De certo modo, conforme afirmou Fustel de Coulanges, quando uma revolução eclode, ela já está terminada. Ele defende a recusa absoluta de um *Dei ex machina*, ou seja, de acontecimentos repentinos, mirabolantes, que operam drasticamente sobre a história. A história, para ele, é construída lentamente. A Revolução Francesa, por exemplo, teria tido seu início não na década de 1780, mas sim em algum momento na Baixa Idade Média, quando teriam começado a erodir as bases do Antigo Regime. Somente ampliando o recorte temporal seria possível ao historiador observar os lentos processos — quase geológicos — que conduzem aos acontecimentos. Cf. Hartog, François. *Le XIX^e siècle et l'histoire*: le cas Fustel de Coulanges. Paris: Éditions du Seuil, 2001, em particular p. 17 e p. 83.

desconstrução da autoridade de Bohr. Assim, conforme mostramos, analisar a formação de uma heterodoxia passa por analisar o lento processo de desconstrução de uma autoridade. No caso de DeWitt, esse processo começou com o ensaio de 1953 e com o curso de Schwinger de 1954, nos quais novos modos de organização da teoria quântica se mostraram possíveis. Esse processo encontrou ressonância talvez com a sua educação religiosa, marcada pelo realismo. Somente ao observarmos DeWitt nesta longa duração que vai aproximadamente de 1950 a 1970 que podemos compreender as suas escolhas em 1967. A ampliação da duração é fundamental para a observação de erosões teóricas.

Entretanto, não basta efetuar uma mudança na escala temporal se ela não vier acompanhada de uma mudança nos métodos de análise. Como observa Michel de Certeau,

A historiografia mexe constantemente com a história que estuda (...) A pesquisa daquilo que deve ter ocorrido, durante [um determinado período] para que se produzissem os fatos constatados [no período imediatamente posterior], normalmente pede uma reflexão a respeito daquilo que deve ocorrer e mudar hoje, nos procedimentos historiográficos, para que tais ou quais séries de elementos, que não entravam no campo dos procedimentos de análise empregados até então, apareçam.²

A mudança nos métodos de análise é uma mudança no olhar. Ao olharmos os trabalhos sobre interpretação da teoria quântica publicados nos anos 1950 e 1960, devemos evitar enxergar neles obras sólidas, dispendiosas, raras, definitivas, ou seja, patentes. Devemos entender que esses trabalhos visam somente se dissolver naquilo que tornam possível, a saber, pensar a teoria quântica de outro modo.³ Esse pensar diferente não se expõe necessariamente em novos programas teóricos ou em rupturas espetaculares, mas no modo como os argumentos tradicionais são engendrados na prática cotidiana da física e vão sendo, pouco a pouco, deslocados dos seus significados originais. Os textos canônicos continuam citados e reverenciados, lealdades são exclamadas, mas por detrás se opera uma mudança. O “surripiar da inventividade na margem dos textos legais” é um elemento

²Certeau. *L'écriture de l'histoire*. Paris: Gallimard, 1975, citação p. 146. Tradução em *A escrita da história*. Rio de Janeiro: Forense, 2011, citação p. 116.

³Cf. Certeau, Michel de. *L'invention du quotidien*, 1. Paris: Gallimard, 1990.

fundador de heterodoxias.⁴ Foi a partir dele que novas formas de se utilizar a medição dos campos quânticos surgiram; foi a partir dele que DeWitt se aproximou da interpretação de Everett.

Nessa perspectiva, a história das interpretações da teoria quântica deve ser vista como uma história da leitura e, de modo mais amplo, como uma história cultural das práticas cotidianas. Essas práticas exprimem um modo de fazer diferente que ainda não tem uma formulação teórica própria. Mudam as formas como os textos são lidos e os argumentos são utilizados, ainda que os vocabulários e as referências bibliográficas permaneçam intactos. Como afirma Michel de Certeau,

As mutações que afetam o “crível” em uma sociedade parecem se manifestar, no nível das práticas, por uma série de funcionamentos novos que ainda não são acompanhados de expressões teóricas adequadas, nem de esboços espetaculares. O conteúdo das práticas não muda, mas muda o que eu chamo de formalidade.⁵

Ao historiador cabe a tarefa de articular o discurso dos físicos, identificando novas práticas e, com isso, marcando as distâncias entre os discursos que reivindicam uma pretensa adesão a uma ortodoxia e as práticas cotidianas heterodoxas que se afastam dessa ortodoxia. As heterodoxias precisam ser desveladas.

A análise histórica da formação das heterodoxias quânticas deve ser, portanto, um estudo de como os argumentos teóricos são alterados com o uso, de como os modos de empregar argumentos mudam com o tempo. A análise deve atentar às pequenas alterações nos *modos de usar*. Para ser possível escrevermos a história das heterodoxias quânticas é, portanto, necessário repensarmos, desde o ponto de partida, a questão do olhar do historiador e da visibilidade da história.⁶

⁴Cf. Certeau, Michel de. **La culture au pluriel**. Paris: Éditions du Seuil, 1993, expressão na p. 216. Tradução retirada de **A cultura no plural**. Campinas: Papirus, 2008, pp. 244-245. No original dessa expressão, Certeau utiliza a palavra “grignoter”, que pode ser traduzida como surripiar, morder furtivamente, roubar a pequenos pedaços.

⁵Certeau. **A escrita da história**, *op. cit.*, citação p. 151.

⁶Talvez estejamos aqui diante de um problema similar àquele posto pelo historiador italiano Pietro Redondi: “Os novos documentos descobertos explicam tudo?, me perguntarão ironicamente. Não, tudo não. Apenas nos ensinam a procurar olhar de um outro modo as mesmas aparências de antes e é isto o que conta. Ensinam-nos um pouco daquela arte do olhar que nossos olhos epistemológicos modernos perderam irremediavelmente.” Redondi, Pietro. **Galileu herético**. São Paulo: Companhia das Letras, 1991, p. 359.

Bibliografia

Para uma lista dos arquivos consultados e uma explicação das suas respectivas abreviaturas, vide a seção “Notações” no início desta tese.

Correspondências

Angelo Loinger para Léon Rosenfeld, 30.06.1965, RP 4-2-6.

Agnew Bahnson para Bryce DeWitt e Cécile DeWitt-Morette, 30.05.1955. DF, box “IFP”, folder “IFP Historical”. Reproduzido na íntegra em DeWitt-Morette, Cécile. **The Pursuit of Quantum Gravity**. Berlim: Springer, 2011, pp. 71-73.

Bryce DeWitt para Hugh Everett, 07.05.1974. DF, box “Letter”, folder “2001 - Correspondence about Everett + 1974 corresp. with Everett”.

Bryce DeWitt para John Wheeler, 07.05.1957. Cópia em EA, também reproduzido digitalmente em EM, 1145.

Bryce DeWitt para Karl von Meyenn, 12.09.1991. DF, box “Letters”, folder “Pauli”.

Bryce DeWitt para Léon Rosenfeld, 11.01.1961. RP, 8-11-6.

Bryce DeWitt para Niels Bohr, 11.01.1961. BSCS, p. 71.

Bryce DeWitt para Sam Schweber, 06.12.1988. Reproduzida parcialmente em DeWitt-Morette, Cécile. **The Pursuit of Quantum Gravity**. Berlim: Springer, 2011, pp. 51-52.

Bryce DeWitt para John Wheeler, 24.09.1979. Cópia digitalizada disponível em EM, 1181.

Cécile DeWitt-Morette “aux anciens élèves et professeurs de l’école d’été du (sic) Physique Théorique aux Houches”, s/d. RP, 7-4-2.

Cécile DeWitt-Morette para Agnew Bahnson, 13.05.1959. DF, box “IFP”, sem folder.

Cécile DeWitt-Morette para Léon Rosenfeld, 25.03.1951. RP, 7-4-2.

Cécile DeWitt-Morette para Léon Rosenfeld, 25.07.1951. RP, 7-4-2.

- Cécile DeWitt-Morette para Léon Rosenfeld**, 06.09.1951. RP, 7-4-2.
- Cécile DeWitt-Morette para Léon Rosenfeld**, 21.02.1952. RP, 7-4-2.
- Cécile DeWitt-Morette para Léon Rosenfeld**, 20.05.1952. RP, 7-4-2.
- Cécile Morette Payen & Carl Bryce Seligman para muitas pessoas**: Invitation pour le Sacrement de Mariage de Mademoiselle Cécile Morette-Payen et Monsieur Bryce Seligman De Witt (sic) à l'église de la Cité Universitaire, Gentilly, le mercredi 2 May 1951. RP, 7-4-2.
- Cécile Morette Seligman (sic) para Léon Rosenfeld**, 11.06.1951. RP, 7-4-2. 144
- Cécile Morette Seligman (sic) para Léon Rosenfeld**, 29.06.1951. RP, 7-4-2.
- Hugh Everett para Bryce DeWitt**, 27.04.1974. DF, box "Letter", folder "2001 - Correspondence about Everett + 1974 corresp. with Everett".
- Hugh Everett para Bryce DeWitt**, 31.05.1957. Cópia em EA, cópia digital disponível em EM, 1132.
- John Wheeler para Niels Bohr**, 21.01.1950. WP, I-5, pasta 'Bohr, Niels #2'.
- John Wheeler para Niels Bohr**, 24.04.1956. Cópia da carta no caderno Wheeler, John. Relativity IV Notebook, p. 64. WP, V-82.
- Josef-Maria Jauch para Léon Rosenfeld**, 26.02.1953. RP, 7-4-3.
- Léon Rosenfeld para Herman Bondi**, 07.09.1961. RP, 8-11-6.
- Léon Rosenfeld para Herman Bondi**, 07.11.1961. RP, 8-11-6.
- Marie-Simone Detoef para Léon Rosenfeld**, 19.06.1957. RP, 7-4-2.
- Niels Bohr para Werner Heisenberg**, 22.05.1935, BC, 120-154. Transcrita Kalckar, Jørgen (ed). Niels Bohr Collected Works v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp. 450-455.
- Niels Bohr para Wolfgang Pauli**, 15.02.1934, BC, 254-74. Transcrita Kalckar, Jørgen (ed). Niels Bohr Collected Works v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp. 31-35.
- Ouboter (Travel Bureau) para Bryce DeWitt**, 08.11.1950. DP, box 4RM174, folder "Research files: Early notes".
- Pierre Donzelot para Léon Rosenfeld**, 27.09.1952. RP, 7-4-2.
- Richard Hall para Cécile DeWitt-Morette e Chris DeWitt**, 22.04.2005. DF, box "Articles", folder "Bryce's Students".
- Rudolf Haag para Léon Rosenfeld**, 10.05.1968. RP 4-3-4.
- Samuel Goudsmit para Walter de Gruyter et Co.**, 21.11.1969. GP, 4-12.
- Werner Heisenberg para Niels Bohr**, 16.06.1929. BC, 120-62. Reproduzida em Kalckar, Jørgen (ed). Niels Bohr Collected Works v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp. 437-440.
- Werner Heisenberg para Wolfgang Pauli**, 12.03.1931. Reproduzida em Kalckar, Jørgen (ed). Niels Bohr Collected Works v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp. 441-2.

Wolfgang Pauli para Carl Bryce Seligman [DeWitt], 08.04.1949. DF, box “Letters”, folder “Pauli”.

Wolfgang Pauli para Carl Bryce Seligman e Cécile Morette, 30.04.1951. Cópia em http://www.ph.utexas.edu/utphysicshistory/UTexas_Physics_History/Cecile_DeWitt-Morette.html (consultado dia 30.08.2013)

Wolfgang Pauli para Robert Oppenheimer, s/d 1949. Parcialmente reproduzida em Schweber, Silvan. *QED and the Men Who Made It*. Princeton: Princeton University, 1994, p. 351.

Notas e manuscritos

Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Field and Charge Measurements in Quantum Theory** (manuscrito não publicado). Reproduzido em Kalckar, Jørgen (ed). **Niels Bohr Collected Works**, v. 7. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp 195-209.

_____. **On the Question of the Measurability of the Electromagnetic Field Strengths**, traduzido por Bryce DeWitt, s/d (provavelmente 1951). DP, box 4RM189, folder homônimo ao texto.

DeWitt, Bryce Seligman. **On the application of quantum perturbation theory to gravitational interactions**, 1950. DF, box “Articles”, folder “PhD thesis”.

DeWitt, Bryce. **A Numerical Method for Two-Dimensional Lagrangian Hydrodynamics**. University of California Radiation Laboratory, UCRL-4250, unclassified report, December 10, 1953. DF, box “Articles”, folder homônimo ao artigo.

_____. **Quantum mechanics**. Cours de L'école d'été de Physique Théorique, Les Houches, 539 pp., été 1953. DP, 2-4RM230, folder “Lecture notes”. Disponível em <http://repositories.lib.utexas.edu/>.

_____. **New Directions for Research in the Theory of Gravitation**. Gravity Research Foundation Essay, 1953. DF, box “Articles”, folder homônimo ao artigo.

_____. **The Operator Formalism in Quantum Perturbation Theory**. United States Atomic Energy Commission, unclassified, UCRL-2884, não publicado, 1955.

_____. **Exploratory Research Session on the Quantization of the Gravitational Field**, at the Institute for Theoretical Physics, Copenhagen, Denmark, June-July 1957. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1957. PC, 8.

_____. **The quantum theory of gravity I: The canonical theory**. Versão preliminar de um artigo publicado no Physical Review (ver seção 3.11 do presente capítulo). DF, box Letters, folder “1961-1977: Correspondence Wheeler”.

_____. **Referee report on paper “Everett’s Theory and the ‘Many Worlds’ Interpretation”**. EM, 1235.

_____. **Application to Guggenheim Fellowship**, c. 1975. DF, box “The Pursuit”.

- Dyson, Freeman. **Advanced Quantum Mechanics**, Supplement (2nd edition), agosto de 1954, citação pp. 21-22. Notas datilografadas em DP, 2-4RM232, folder “By Others”.
- Gravity Foundation. **1953 Awards for Essays on Gravity**, em <http://gravityresearchfoundation.org>.
- Liste de Participants [de l'école de les Houches] 1951-1967. WP, Series I, Box “Co-De”, folder “DeWitt-Morette, Cécile”.
- Regge, Tullio. **On the Measurability of Gravitational Field Strengths in Quantum Mechanics**, manuscrito não publicado. WP, VI-115.
- Schwinger, Julian. **Quantum Dynamics, Part I**. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. December 19, 1952. Cópia em DP, 3-4RM174, folder “Schwinger, Julian”.
- Seligman, Carl Bryce. **Electromagnetic theory of light**, 1946. DP, 4RM189, folder “Student notes of Bryce S. DeWitt”.
- Seligman, Bryce. **A Report on Two Papers by Professor Fermi on High Energy Nuclear Events**. Report of an International Conference on Elementary Particles held at the Tata Institute of Fundamental Research, Bombay, India, December 14-22, 1950. DF, box “Articles”, folder homônimo ao artigo.
- Wheeler, John. **Quantum Electrodynamics Notebook**, caderno de anotações, 1950-1956. WP, V-82.
- _____. **Advanced Quantum Mechanics**, notas de aula, c. 1955. EP, I-1-7.

Entrevistas transcritas e arquivos em áudio

- Entrevista de Bryce DeWitt e Cécile DeWitt-Morette por Kenneth W. Ford**, 28.02.1995, OH.
- Entrevista de Bryce DeWitt por Lars Becker-Larsen**, 10.04.2003. Cedida pelo entrevistador.
- Entrevista de Bryce DeWitt por Sam Schweber**, 15.08.1984. Citado em Schweber, Silvan. **QED and the Men Who Made It**. Princeton: Princeton University, 1994, *passim*.
- Entrevista de Cécile DeWitt-Morette por Thiago Hartz**, 04.08.2011. Feita pelo autor em Austin, EUA.
- Entrevista de Léon Rosenfeld por Thomas Kuhn e John Heilbron**, 19.07.1963, OH.
- Entrevista de Oskar Klein por John Heilbron e Léon Rosenfeld**, 28.02.1963, OH.
- Programa televisivo Archimèdes**, émission du 30 octobre 2001 (em comemoração aos 50 anos da escola de verão em Les Houches). TV5, França. Este programa de televisão foi extinto em 16.12.2003, tendo sido retiradas da internet recentemente as suas transcrições.
- Seminário de Bryce DeWitt em Mazagón, Espanha, 1991**. DP, 6-4RM232, folder “DeWitt and John Wheeler talking in Mazagón, Spain, audiocassette, 1991”.

Livros e artigos (material publicado)

- Andrade, Oswald de. **Manifesto Antropófago**. Revista de Antropofagia, n. 1, pp. 3-4, maio de 1928.
- Babson, Roger. **Gravity - Our enemy number one**. Reproduzido em Collins, Harry. **Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves**. Chicago: University of Chicago, 2004, pp. 828-831.
- Barrett, Jeffrey & Byrne, Peter (ed). **The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary**. Princeton: Princeton University, 2012.
- Baxter, John & Atherton, Patrick (ed). **Aristotle's Poetics**. Montreal: McGill-Queen's University, 1997.
- Beller, Mara. **Quantum Dialogues: the making of a revolution**. Chicago: University of Chicago, 1999.
- Bergmann, Peter. **Introduction to the Theory of Relativity**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1942.
- _____. **Non-Linear Field Theories**. Physical Review, v. 75, pp. 680-685, 1949.
- Bergmann, Peter & Brunings, Johanna. **Non-Linear Field Theories II**. Canonical Equations and Quantization. Reviews of Modern Physics, v. 21, n. 3, pp. 480-487, 1949.
- Bethe, Hans. **The Electromagnetic Shift of Energy Levels**. Physical Review, v. 72, pp. 339-341, 1947.
- Bohm, David. **Quantum Theory**. New York: Prentice Hall, 1951.
- Bohr, Niels. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, v. 2, Bologna: Nicola Zanichelli, pp. 565-588, 1928. Reimpresso em Kalckar, Jørgen (ed). Niels Bohr Collected Works v. 6. Amsterdam: North-Holland, 1985, pp. 113-146.
- _____. **The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory**. Nature (Supplement), v. 121, pp. 580-590, 1928. Reproduzido em Kalckar, Jørgen (ed). **Niels Bohr Collected Works, v. 7**. Amsterdam: North-Holland, 1996.
- _____. **The Atomic Theory and the Fundamental Principles underlying the Description of Nature**. In: N. Bohr. **Atomic Theory and the Description of Nature**. Cambridge University, 1934, pp. 102-119. Reimpresso em Kalckar, Jørgen (ed). **Niels Bohr Collected Works, v. 6**. Amsterdam: North-Holland, 1985, pp. 236-253.
- Bohr, Niels & Rosenfeld, Léon. **Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen**. Mat.-Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk., bd. 12, n. 8, pp. 1-65, 1933. Reimpresso e traduzido (por Aage Petersen) em Kalckar, Jørgen (ed). **Niels Bohr Collected Works, v. 7**. Amsterdam: North-Holland, 1996.
- _____. **Field and Charge Measurements in Quantum Electrodynamics**. Physical Review, v. 78, n. 6, pp. 794-798, 1950.
- Bokulich, Peter. **Horizons of Description: Black Holes and Complementarity**. PhD thesis, Graduate Program in Philosophy, Notre Dame University, Indiana, Estados Unidos, Abril 2003.

- Brogie, Louis de. **Sur une forme plus restrictive des relations d'incertitude**. Actualités Scientifiques et Industrielles, v. XXXI. Paris: Hermann et Cie éditeurs, 1932.
- Bronstein, Matvei. **Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder**. Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, Band 9, Heft 2-3, pp. 140-157, 1936.
- Brown, Laurie (ed). **Renormalization: from Lorentz to Landau (and beyond)**. New York: Springer, 1993.
- Bunge, Mario. **Strife About Complementarity**. The British Journal for the Philosophy of Science, v. 6, n. 21, pp. 1-12, 1955.
- Burckhardt, Jacob. **Griechische Kulturgeschichte**, Band 1. Berlin: W. Spemann, s/d.
- Bustamante, Martha Cecilia. **Jacques Solomon**: Profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente. Revue d'histoire des sciences, v. 50, n.1-2, pp. 49-87, 1997.
- _____. **Jacques Solomon et Paul Langevin**: Filiation et différences. épistémologiques, v. 2, n. 1-2, pp. 177-188, 2002.
- Cao, Tian Yu & Schweber, Sam. **The conceptual foundations and the philosophical aspects of renormalization theory**. Synthese, v. 97, n. 1, pp. 33-108, 1993.
- Carvalho, José Murilo de. **Os bestializados**: o Rio de Janeiro e a República que não foi. Rio de Janeiro: Companhia das Letras, 1987.
- Certeau, Michel de. **L'écriture de l'histoire**. Paris: Gallimard, 1975. Tradução: Certeau, Michel de. **A escrita da história**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2011.
- _____. **L'invention du quotidien**, v. 1 (Arts de faire). Paris: Gallimard, 1990. Tradução: Certeau, Michel de. **A invenção do cotidiano**, v. 1. Petrópolis: Vozes, 2009.
- _____. **La culture au pluriel**. Paris: éditions du Seuil, 1993. Tradução: Certeau, Michel de. **A cultura no plural**. Campinas: Papirus, 2008.
- Chartier, Roger. **Text, Printing, Reading**. In: L. Hunt. **The New Cultural History**. Berkeley: University of California Press, 1989, pp. 154-175.
- Chevalley, Catherine. **La connaissance a-t-elle un sujet?** Un essai pour repenser l'individu. Revue européenne des sciences sociales, v. 40, n. 124, pp. 7-26, 2002.
- Cohen, Robert & Stachel, John. **Selected Papers of Léon Rosenfeld**. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. XXI. Dordrecht: D. Reidel, 1979.
- Corinaldesi, Ernesto. **Some Aspects of the Problem of Measurability in Quantum Electrodynamics**. II Nuovo Cimento, supplemento al v. 10, serie 9, 2, p. 83, 1953.
- Darrigol, Olivier. **La genèse du concept de champ quantique**. Annales de Physique, v. 9, n. 3, pp. 433-501, 1984.
- _____. **Revue de Ulrich Röseberg Niels Bohr**: Leben und Werk eines Atomphysikers. Revue d'Histoire des Sciences, v. 40, n. 1, pp. 139-140, 1987.

- _____. **Cohérence et complétude de la mécanique quantique: l'exemple de «Bohr-Rosenfeld».** *Revue d'histoire des sciences*, v. 44, n. 2, pp. 137-179, 1991.
- _____. **The Historians' Disagreements over the Meaning of Planck's Quantum.** *Centaurus*, v. 43, n. 3-4, pp. 219-239, 2001.
- Deutsch, David *et alii*. **Bryce Seligman DeWitt** (obituário). *Physics Today*, v. 58, n. 3, p. 84, 2005.
- DeWitt-Morette, Cécile (ed). **Conference on the Role of Gravitation in Physics.** WADC Technical Report 57-216. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1957. Recentemente republicado em DeWitt-Morette, Cécile & Rickles, Dean. *The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference.* Berlim: Open Access, 2011.
- _____. **180 Degrees of Aberration.** *Scientific American*, letters to the editor, April 10, 2008.
- _____. **DeWitt not split on many worlds idea.** *APS News*, v. 18, n. 9, letters to the editor, 2009.
- _____. **The pursuit of quantum gravity.** Berlim: Springer, 2011.
- DeWitt, Bryce. **Point Transformations in Quantum Mechanics.** *Physical Review*, v. 85, n. 4, 1952.
- _____. **State Vector Normalization in Formal Scattering Theory.** *Physical Review*, v. 100, n. 3, pp. 905-911, 1955.
- _____. **Papers from the Conference on the Role of Gravitation in Physics.** Held at the University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, January 18-23, 1957. *Reviews of Modern Physics*, v. 29, n. 3, p. 351, 1957.
- _____. **Dynamical Theory in Curved Spaces. I.** A Review of the Classical and Quantum Action Principles. *Reviews of Modern Physics*, v. 29, n. 3, pp. 377-397, 1957.
- _____. **Invariant Commutators for the Quantized Gravitational Field.** *Physical Review Letters*, v. 4, n. 6, pp. 317-320, 1960.
- _____. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups.** *Journal of Mathematical Physics*, v. 2, n. 2, p. 151-162, 1961.
- _____. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups. II.** Anticommuting Fields. *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, pp. 625-636, 1962.
- _____. **Quantization of Fields with Infinite-Dimensional Invariance Groups. III.** Generalized Schwinger-Feynman Theory. *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, pp. 1073-1093, 1962.
- _____. **Quantum Theory without Electromagnetic Potentials.** *Physical Review*, v. 125, n. 6, pp. 2189-2191, 1962.
- _____. **Invariant Commutators for the Quantized Gravitational Field.** In: P. Bergmann. **Recent Developments in General Relativity.** London: Pergamon Press, 1962, pp. 175-189.
- _____. **Definition of Commutators via the Uncertainty Principle.** *Journal of Mathematical Physics*, v. 3, n. 4, 1962.

- _____. **The Quantization of Geometry**. In: L. Witten (ed). **Gravitation**: an introduction to current research. New York: John Wiley & Sons, 1962, pp. 266-381.
- _____. **The Quantization of Geometry**. In: Morris E. Rose (ed). **Proceedings of the Eastern Theoretical Physics Conference**, October 26-27, 1962. New York: Gordon and Breach, 1963, pp. 353-386.
- _____. **The Quantization of Geometry**. In: L. Infeld (ed). **Proceedings on the Theory of Gravitation**, Conference in Warsaw and Jablonna 25-31 July 1962. Varsóvia: Editions Scientifiques de Pologne, 1964, pp 131-147.
- _____. **Dynamical Theory of Groups and Fields**. In: C. Morette-DeWitt & B. DeWitt (ed). **Relativity, Groups, and Topology**. 1963 Les Houches Lectures. New York: Gordon and Breach, 1964, pp. 587-820.
- _____. **Quantum Theory of Gravity. I**. The Canonical Theory. *Physical Review*, v. 160, n. 5, pp. 1113-1148, 1967.
- _____. **Quantum Theory of Gravity. II**. The Manifestly Covariant Theory. *Physical Review*, v. 162, n. 5, pp. 1195-1239, 1967.
- _____. **Quantum Theory of Gravity. III**. Applications of the Covariant Theory. *Physical Review*, v. 162, n. 5, pp. 1239-1256, 1967.
- _____. **The Everett-Wheeler Interpretation of Quantum Mechanics**. In: C. M. DeWitt & J. A. Wheeler (eds). **Battelle Rencontres**: 1967 Lectures in Mathematics and Physics. New York: W.A. Benjamin, 1968, pp. 318-332.
- _____. **Quantum Mechanics and Reality**. *Physics Today*, v. 23, n. 9, pp. 30-35, 1970.
- _____. **The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics**. In: Espagnat, Bernard d' (ed). **Fondamenti di meccanica quantistica**: Rendiconti della scuola internazionale di fisica Enrico Fermi. New York: Academic Press, 1971, pp. 211-262. Reimpresso em DeWitt, Bryce & Graham, R. Neill (ed). **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**. Princeton: Princeton University, 1973, pp. 167-218.
- _____. **Preliminary remarks before beginning his technical talk**. In: Ng, Y. Jack (ed). **Julian Schwinger**: The Physicist, the Teacher, and the Man. Singapore: World Scientific, 1996, pp. 29-31.
- _____. **The Global Approach to Quantum Field Theory**. New York: Oxford University, 2003.
- _____. **God's Rays**. *Physics Today*, v. 58, n. 1, 2005, pp. 32-34.
- _____. **Quantum Gravity**: Yesterday and Today. *General Relativity and Gravitation*, v. 41, n. 2, pp. 413-419, 2009.
- DeWitt, Bryce Seligman & DeWitt-Morette, Cécile. **The Quantum Theory of Interacting Gravitational and Spinor Fields**. *Physical Review*, v. 87, n. 1, pp. 116-122, 1952.

- DeWitt, Bryce & Graham, R. Neill. **Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics**. American Journal of Physics, v. 39, n. 7, pp. 724-738, 1971.
- _____. (ed). **The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics**. Princeton: Princeton University, 1973.
- DeWitt, Bryce; Ballentine, Leslie E.; Pearle, Philip; Walker, Evan Harris; Sachs, Mendel; Koga, Toyoki; & Gerver, Joseph. **Quantum-mechanics debate**: not everyone agrees with Bryce DeWitt that acceptance of quantum theory implies belief in a continually splitting universe. Physics Today, v. 34, n. 4, pp. 36-44, 1971.
- Dirac, Paul. **The Dynamical Theory of Fields**. Canadian Mathematical Congress, University of British Columbia, agosto de 1949.
- _____. **Generalized Hamiltonian Dynamics**. Canadian Journal of Mathematics, v. 2, pp. 129-148, 1950.
- Dongen, Jeroen van. **Einstein's Unification**. Cambridge: Cambridge University, 2010.
- Duarte, Rogério. **Notas Sobre o Desenho Industrial**. Revista Civilização Brasileira, n. 4, pp. 227-247, 1965.
- Dyson, Freeman. **Feynman at Cornell**. Physics Today, v. 42, n. 2, p. 32, 1989.
- _____. **Advanced Quantum Mechanics**. Organizado por David Derbes. Singapore: World Scientific, 2007.
- Eisenstaedt, Jean. **Einstein et la relativité générale: les chemins de l'espace-temps**. Paris: CNRS, 2013.
- Everett, Hugh. **"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics**. Reviews of Modern Physics, v. 29, n. 3, pp. 454-462, 1957.
- Feyerabend, Paul. **Killing Time: The Autobiography of Paul Feyerabend**. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- Fock, Vladimir. **Zur Quantenelektrodynamik**. Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, Band 6, pp. 425-469, 1934. Citamos a partir da tradução para inglês de E. D. Trifonov em L.D. Faddeev *et alii* (ed). **V.A. Fock selected works: quantum mechanics and quantum field theory**. New York: Chapman & Hall, 2004, pp. 331-368.
- Fokker, Adriaan (ed). **Proceedings of the Lorentz Kamerlingh Onnes Memorial Conference**. Leiden University, 22-26 June, 1953. Amsterdam: Physica, 1953.
- Forman, Paul. **Weimar culture, causality, and quantum theory**: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment. Historical Studies in Physical and Biological Sciences, v. 3, pp. 1-115, 1971.
- Foucault, Michel. **Qu'est-ce qu'un auteur?** (1969). In: Michel Foucault. **Dits et Ecrits, v. 1**. Paris: Gallimard, 1994, pp. 789-821.

- _____. **Entretien sur la prison: le livre et sa méthode** (1975). In: Michel Foucault. **Dits et Ecrits**, v. 2. Paris: Gallimard, 1994, pp. 740-753.
- Freire Jr, Olival. **Quantum Controversy and Marxism**. *Historia Scientiarum*, v. 7, pp. 137-152, 1997.
- _____. **A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950-1970**. *Science & Education*, v. 12, n. 5-6, pp. 573-586, 2003.
- _____. **Popper, probabilidade e teoria quântica**. *Episteme*, v. 18, pp. 103-127, 2004.
- _____. **The Historical Roots of “Foundations of Quantum Physics” as a Field of Research (1950-1970)**. *Foundations of Physics*, v. 34, pp. 1741-1760, 2004.
- _____. **Science and exile: David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics**. *Historical Studies in Physical and Biological Sciences*, v. 36, pp. 1-34, 2005.
- _____. **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, n. 4, pp. 577-616, 2006.
- _____. **Orthodoxy and Heterodoxy in the Research on the Foundations of Quantum Physics: E.P. Wigner’s Case**. In: Boaventura de Sousa Santos (org). **Cognitive Justice in a Global World: Prudent Knowledges for a Decent Life**, vol. 1. Lanham: Lexington, 2007, pp. 203-224.
- _____. **Quantum dissidents: Research on the foundations of quantum theory circa 1970**. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, pp. 280-289, 2009.
- _____. **Dissidentes quânticos: pesquisa em fundamentos da teoria quântica em torno de 1970**. In: Olival Freire Jr; Osvaldo Pessoa Jr; Joan Lisa Bromberg (ed). **Teoria Quântica: Estudos Históricos e Implicações Culturais**. Campina Grande: Editora UEPB & Livraria da Física, 2010, pp. 33-64.
- _____. **Ciência e política na Itália dos anos 1970**. In: O. Freire Jr & S. Carneiro (ed). **Ciência, filosofia e política: uma homenagem a Fernando Bunchaft**. Salvador: EDUFBA, 2013, pp. 107-122.
- _____. **Orthodoxies on the Interpretation of Quantum Theory: The Case of the Consistent History Approach**. In: S. Katzir, C. Lehner & J. Renn (ed). **Traditions and Transformations in the History of Quantum Physics**. Berlim: Open Access, 2013, pp. 293-307.
- Freitas, Fábio & Freire Jr, Olival. **A formulação dos ‘estados relativos’ da teoria quântica**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 2, artigo n. 2307, 2008.
- _____. **Sobre o uso da Web of Science como fonte para a história da ciência**. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 1, n. 2, pp. 129-147, 2003.
- Galison, Peter. **Culturas etéreas e culturas materiais**. In: Fernando Gil (ed). **A ciência tal qual se faz**. Lisboa: Edições João Sá da Costa, 1999, pp. 395-414.
- Gamow, George. **Über den heutigen Stand der Theorie des β -Zerfalls**. *Physikalische Zeitschrift*, Band 38, pp. 800-814, 1937.

- George L. Trigg, M. Hammerton, R. Hobart Ellis Jr, Robert Goldston e Helmut Schmidt. **Still more quantum mechanics**. Physics Today, v. 24, n. 10, pp. 11-15, 1971.
- Giard, Luce. **Histoire d'une recherche**. In: M. de Certeau. **L'invention du quotidien**, 1. Paris: Gallimard, 1990, pp. i-xxx.
- Ginzburg, Carlo. **Checking the Evidence: The Judge and the Historian**. Critical Inquiry, v. 18, n. 1, pp. 79-92, 1991.
- Gleick, James. **Genius: The Life and Science of Richard Feynman**. New York: Vintage Books, 1993.
- Goldberg, Joshua. **US Air Force Support of General Relativity: 1956-1972**. In: J. Eisenstaedt & A. J. Kox (ed). **Studies in the History of General Relativity** (Einstein Studies, v. 3). Boston: Birkhaeuser, 1992, pp. 89-102.
- Gorelik, Gennady. **First Steps of Quantum Gravity and the Planck Values**. In: J. Eisenstaedt & A. J. Kox (ed). **Studies in the History of General Relativity** (Einstein Studies, v. 3). Boston: Birkhaeuser, 1992, pp. 364-379.
- _____. **Matvei Bronstein and quantum gravity: 70th anniversary of the unsolved problem**. Physics-Uspekhi, v. 48, n. 10, pp. 1039-1053, 2005.
- Gorelik, Gennady & Frenkel, Victor. **Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties**. Zurich: Birkhauser, 1994.
- Grinstein, Louise *et alii* (eds). **Women in Chemistry and Physics: A Biobibliographic Sourcebook**. New York: Greenwood, 1993, pp. 150-161.
- Guimarães, Manoel Salgado. **Usos da História: refletindo sobre identidade e sentido**. História em Revista (Pelotas), v. 6, pp. 21-36, 2000.
- Gumbrecht, Hans Ulrich. **Modernização dos sentidos**. Rio de Janeiro: Editora 34, 1998.
- Hacking, Ian. **From the Emergence of Probability to the Erosion of Determinism**. In: T. Hintikka, D. Gruender & E. Agazzi (eds). **Probabilistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science**, vol. 2. Dordrecht: D. Reidel, 1981, pp. 105-123.
- Hall, Karl. **'Think less about foundations': A Short Course on the Course of Theoretical Physics of Landau and Lifshitz**. In: David Kaiser. **Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspective**. Cambridge, US: MIT Press, 2005, pp. 253-286.
- _____. **The Schooling of Lev Landau: The European Context of Post-revolutionary Soviet Theoretical Physics**. Osiris, v. 23, n. 1, 2008, pp. 230-259.
- Halpern, Paul. **Quantum Humor: The Playful Side of Physics at Bohr's Institute for Theoretical Physics**. Physics in Perspective, v. 14, n. 3, pp. 279-299, 2012.
- Hartog, François. **A fábrica da história: do "acontecimento" à escrita da história**. História em Revista (Pelotas), v. 6, pp. 7-19, 2000.

- _____. **Le miroir d'Hérodote**. Paris: Gallimard, 2001.
- _____. **Le XIXe siècle et l'histoire**: le cas Fustel de Coulanges. Paris: Seuil, 2001.
- _____. **Régimes d'historicité**: Présentisme et expériences du temps. Paris: Seuil, 2003.
- _____. **Évidence de l'histoire**: Ce que voient les historiens. Paris: Gallimard, 2005.
- Hartz Maia, Thiago. **Estudos de teoria quântica de campos com comprimento fundamental**. Dissertação de Mestrado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- Heilbron, John. **The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit**. *Revue d'Histoire des Sciences*, v. 38, n. 3-4, pp. 195-230, 1985.
- Heisenberg, Werner. **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik**. *Zeitschrift für Physik*, v. 43, n. 3-4, pp. 172-198, 1927. Tradução para o inglês **The physical content of quantum kinematics and mechanics**. In: John A. Wheeler & Wojciech H. Zurek. **Quantum Theory and Measurement**. Princeton: Princeton University, 1984, pp. 62-84.
- _____. **The Physical Principles of Quantum Theory**. Chicago: University of Chicago Press, 1930.
- _____. **Physics and Beyond: Encounters and Conversations**. New York: Harper & Row, 1971.
- Heisenberg, Werner & Pauli, Wolfgang. **Zur Quantendynamik der Wellenfelder I**. *Zeitschrift für Physik*, v. 56, n. 1-2, pp. 1-61, 1929.
- _____. **Zur Quantendynamik der Wellenfelder II**. *Zeitschrift für Physik*, v. 59, n. 3-4, pp. 168-190, 1931.
- Henley, Ernest & Thirring, Walter. **Elementary Quantum Field Theory**. New York: McGraw-Hill, 1962.
- Hilgevoord, Jan & Uffink, Jos. **The Uncertainty Principle**. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, online em <http://plato.stanford.edu>, 2006.
- Hilgevoord, Jan. **Time in quantum mechanics**. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, pp. 301-306, 2002.
- Howard, Don. **Physics as Theodicy**. In: Murphy, Nancey *et alii* (eds). **Physics and Cosmology: Scientific Perspectives on the Problem of Natural Evil**. Vatican City: Vatican Observatory, 2007, pp. 323-332.
- _____. **Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology**. *Philosophy of Science*, v. 71, pp. 669-682, 2004.
- Infeld, Leopold (ed). **Relativistic Theories of Gravitation**. *Proceedings on the Theory of Gravitation, Conference in Warszawa and Jablonna 25-31 July 1962*. Warszawa: Editions Scientifiques de Po-logne, 1964.
- Isham, Chris J. **The contributions of Bryce DeWitt to quantum gravity**. In: S. M. Christensen (ed). **Quantum Theory of Gravity: essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. DeWitt**. Bristol: Adam Hilger, 1984, pp. 22-41.

- Jacobsen, Anja Skaar. **Léon Rosenfeld's Marxist defense of complementarity**. Historical Studies in Physical and Biological Sciences, v. 37, supplement, pp. 3-34, 2007.
- _____. **The Complementarity Between the Collective and the Individual: Rosenfeld and Cold War History of Science**. Minerva, v. 46, n. 2, pp. 195-214, 2008.
- _____. **Crisis, measurement problems, and controversy in early quantum electrodynamics: The failed appropriation of epistemology in the second quantum generation**. In: C. Carson *et alii* (ed). **Weimar culture and quantum mechanics**. London: Imperial College Press, 2011, pp. 375-396.
- _____. **Leon Rosenfeld: Physics, Philosophy, and Politics in the Twentieth Century**. Singapore: World Scientific, 2012.
- Jammer, Max. **The philosophy of quantum mechanics: The interpretations of quantum mechanics in historical perspective**. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- Jauch, Josef-Maria & Rohrlich, Fritz. **The Theory of Photons and Electrons**. Reading: Addison-Wesley, 1955.
- Kaiser, David. **Is a Ψ just a Ψ ? Pedagogy, Practice, and the Reconstitution of General Relativity, 1942-1975**. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, v. 29, n. 3, pp. 321-338, 1998, em particular pp. 324-328.
- _____. **Stick-Figure Realism: Conventions, Reification, and the Persistence of Feynman Diagrams, 1948-1964**. Representations, v. 70, pp. 49-86, 2000.
- _____. **Comments on "Interpreting quantum mechanics: a century of debate"**. HSS Session, Washington, Novembro de 2007, não publicado
- Kaiser, David; Ito, Kenji & Hall, Karl. **Spreading the Tools of Theory: Feynman Diagrams in the United States, Japan, and the Soviet Union**. Social Studies of Science, v. 34, n. 6, pp. 879-922, 2004.
- Kalckar, Jørgen. **Measurability problems in the quantum theory of fields**. In: B. d'Espagnat (ed). **Fondamenti di meccanica quantistica: Rendiconti della scuola internazionale di fisica Enrico Fermi**. New York: Academic Press, 1971, pp. 127-169.
- _____. (ed). **Niels Bohr Collected Works, v. 6**. Amsterdam: North-Holland, 1985.
- _____. (ed). **Niels Bohr Collected Works, v. 7**. Amsterdam: North-Holland, 1996.
- _____. **Introduction**. In: Kalckar, Jørgen (ed). **Niels Bohr Collected Works v. 7**. Amsterdam: North-Holland, 1996, pp. 3-51.
- Kipling, Rudyard. **Kim**. London: MacMillan, 1950.
- Klein, Abraham. **Recollections of Julian Schwinger**. In: Ng, Y. Jack (ed). **Julian Schwinger: The Physicist, the Teacher, and the Man**. Singapore: World Scientific, 1996, pp. 1-7.
- Kojève, Alexandre. **La notion d'autorité**. Paris: Gallimard, 2004, pp. 56-65.

- Kojevnikov, Alexei. **Stalin's Great Science: The Times and Adventures of Soviet Physicists**. London: Imperial College Press, 2004.
- _____. **The Last Century of Physics**. *Annals of Science*, v. 59, pp. 419-422, 2002.
- Koselleck, Reinhart. **Future Past: On the Semantics of Historical Time**. New York: Columbia University, 2004.
- Kragh, Helge. **Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century**, Princeton: Princeton University, 1999.
- _____. **Arthur March, Werner Heisenberg, and the search for a smallest length**. *Revue d'histoire des sciences*, v. 48, n. 4, pp. 401-434, 1995.
- Lamb, Willis & Retherford, Robert. **Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method**. *Physical Review*, v. 72, pp. 241-243, 1947.
- Landau, Lev & Lifshitz, Evgeny. **Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory**. Oxford: Pergamon Press, 1958.
- Landau, Lev & Peierls, Rudolf. **Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie**. *Zeitschrift für Physik*, v. 69, n. 1-2, pp 56-69, 1931, citação na p. 69. Há uma tradução, com alguns graves erros, em Ter-Haar, Dirk. **Collected papers of L. D. Landau**. New York: Gordon and Breach, 1965, pp. 40-51.
- Lessing, Gotthold. **Lessings Werke, Efter Teil**. Berlim & Stuttgart: Verlag von W. Spemann, s/d. Lochak, Georges. Louis de Broglie. Paris: Flammarion, 1992.
- MacKinnon, Edward Michael. **Interpreting Physics: Language and the Classical/Quantum Divide** (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 289). Dordrecht: Springer, 2012.
- Mariani, Jean. **Non-euclidean geometry in microscopic space**. *Nature*, v. 143, p. 683, 1939.
- Martialis, Marcus Valerius. **Martial Epigrams, v. 1**. London: William Heinemann, 1919 (original 86-103 d.C.).
- Mehra, Jagdish & Milton, Kimball. **Climbing the Mountain: The Scientific Biography of Julian Schwinger**. Oxford: Oxford University, 2000.
- Miller, Arthur. **Measurement Problems in Quantum Field Theory in the 1930's**. In: A. I. Miller (ed). **Sixty-Two Years of Uncertainty: Historical, Philosophical, and Physical Inquiries into the Foundations of Quantum Mechanics**. New York: Plenum Press, 1990, pp. 139-152.
- Morette-Payen, Cécile. **Particules élémentaires**. Suivi de "Guide to literature of elementary particle physics", par Cécile Morette-Payen, Jayme Tiomno, et John Archibald Wheeler (*Actualités Scientifiques et Industrielles* v. 1131). Paris: Hermann, 1951.
- Murdoch, Dugald. **Niels Bohr's Philosophy of Physics**. Cambridge: Cambridge University, 1989.

- Myers, Howard. **Breakthrough in Gravitational Research Made at Chapel Hill**. Twin City Sentinel (periódico, Winston-Salem, North Carolina), 07.03.1958. Exemplar em DP, CONS-Scrapbook.
- Ng, Y. Jack (ed). **Julian Schwinger: The Physicist, the Teacher, and the Man**. Singapore: World Scientific, 1996.
- Nora, Pierre. **Between Memory and History**. Representations, v. 23, pp. 7-25, Spring 1989.
- Osnaghi, Stefano. **A Dissolução Pragmático-Transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica**. Cadernos de História e Filosofia das Ciências, Série 3, v. 15, pp. 79-124, 2005.
- Osnaghi, Stefano; Freitas, Fábio; & Freire Jr, Olival. **The origin of the Everettian heresy**. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, v. 40, pp. 97-123, 2009.
- Pais, Abraham. **Niels Bohr Times: in Physics, Philosophy, and Polity**. Oxford: Oxford University, 1991.
- Parti Communiste Français. **Un plan USA de mainmise sur la science**. Paris: Nouvelle Critique, 1953.
- Pauli, Wolfgang. **Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten, Teil I: Klassische Theorie**. Annalen der Physik, v. 410, n. 3, pp. 305-336, 1933.
- _____. **Über die Formulierung der Naturgesetze mit fünf homogenen Koordinaten, Teil II: Die Diracschen Gleichungen für die Materiewellen**. Annalen der Physik, v. 410, n. 4, pp. 337-372, 1933.
- Payen, Pascal. **Les Anciens en figures d'autorité**. In: D. Foucault & P. Payen (eds). **Les autorités: dynamiques et mutations d'une figure de référence à l'antiquité**. Grenoble: éditions Jérôme Millon, 2007.
- Pessoa Jr, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica, v. 1**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- Pessoa Jr, Osvaldo; Freire Jr., Olival & de Greiff, Alexis. **The Tausk Controversy on the Foundations of Quantum Mechanics: Physics, Philosophy, and Politics**. Physics in Perspective, v. 10, n. 2, pp. 138-162, 2008.
- Pirani, Felix & Schild, Alfred. **On the Quantization of Einstein's Gravitational Field Equations**. Physical Review, v. 79, pp. 986-991, 1950.
- Pole, Joyce. **French government honors faculty member: Professor DeWitt-Morette named a knight in National Order of Merit**. On Campus, quinzena de 24 de novembro a 7 de dezembro, 1980.
- Rancière, Jacques. **Les noms de l'histoire: Essai de poétique du savoir**. Paris: Seuil, 1992.
- Redondi, Pietro. **Galileu herético**. São Paulo: Companhia das Letras, 1991.
- Ribeiro, João Ubaldo. **O sorriso do lagarto**. Rio de Janeiro: Editora Record, s/d [1989].
- Rickles, Dean. **Quantum Gravity meets &HPS**. In: S. Mauskopf & T. Schmaltz. **Integrating History and Philosophy of Science: Problems and Prospects**. Dordrecht: Springer, 2010, pp. 163-199.
- _____. **The Chapel Hill Conference in Context**. In: C. Morette-DeWitt & D. Rickles. **The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference**. Berlin: Open Access, 2011, pp. 7-21.

- Ricoeur, Paul. **A memória, a história, o esquecimento**. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.
- Rocha, Glauber. **Tropicalismo, antropologia, mito, ideograma** (publicado originalmente em 1969). In: *Id.* **Revolução do Cinema Novo**. São Paulo: Cosac & Naify, 2004, pp. 150-154.
- _____. **Beginning at Zero: Notes on Cinema and Society**. *The Drama Review*, v. 14, n. 2, pp. 144-149, 1970.
- Rosenfeld, Léon & Møller, Christian. **Electromagnetic properties of nuclear systems in meson theory**. *Mat.-fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, v. 20, n. 12, pp. 1-66, 1943.
- _____. **My Initiation (paraphysical recollections)**. *Journal of Jocular Physics* (Institute of Theoretical Physics, Copenhagen), v. 2, p. 7, Outubro de 1945.
- _____. **Matter and Force After Fifty Years of Quantum Theory**. In: S.K. Runcorn (ed). **Physics in the Sixties**. London: Oliver & Boyd, 1963, pp. 1-22. Reproduzido em Cohen, Robert & Stachel, John (ed). **Selected Papers of Léon Rosenfeld**. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. XXI. Dordrecht: D. Reidel, 1979, pp. 247-265.
- _____. **On quantization of fields**. *Nuclear Physics*, v. 40, pp. 353-356, 1963.
- _____. **The Measuring Process in Quantum Mechanics**. *Progress of Theoretical Physics Supplements*, volume extra, pp. 222-231, 1965.
- _____. **Quantentheorie und gravitation**. In: J. Treder (ed). **Einstein-Symposium: Entstehung, Entwicklung und Perspektiven der Einsteinschen Gravitationstheorie**. Berlin: Akademie-Verlag, 1966. Consultamos a tradução para o inglês **Quantum Theory and Gravitation**, em Cohen, Robert & Stachel, John (ed). **Selected Papers of Léon Rosenfeld**. Boston Studies in the Philosophy of Science, v. XXI. Dordrecht: D. Reidel, 1979, pp. 599-608.
- _____. **My Initiation**. In: R. L. Weber & E. Mendoza (ed). **A random walk in science**. London: Institute of Physics Publishing, 1999, pp. 80-83. Reproduzido em RP, pp. xxxi-xxxiv.
- _____. **Statistical mechanics**. São Paulo: Livraria da Física, 2007.
- Rossi, Paolo. **O nascimento da ciência moderna na Europa**. Bauru: EDUSC, 2001.
- Rueger, Alexander. **Attitudes towards Infinities: Responses to Anomalies in Quantum Electrodynamics**. *Historical Studies in Physical and Biological Sciences*, v. 22, n. 2, pp. 309-337, 1992.
- Rugh, Svend E. & Zinkernagel, Henrik. **The Quantum Vacuum and the Cosmological Constant Problem**. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 33, n. 4, pp. 663-705, 2002.
- Said, Edward. **Representações do intelectual**. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.
- Salecker, Helmut. **Conceptual Clock Models**. In: C. DeWitt-Morette & D. Rickles. **The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference**. Berlin: Open Access, 2011.
- Salecker, Helmut & Wigner, Eugene. **Quantum Limitations of the Measurement of Space-Time Distances**. *Physical Review*, v. 109, n. 2, pp. 571-577, 1958.

- Salisbury, Donald. **Léon Rosenfeld and the challenge of the vanishing momentum in quantum electrodynamics**. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, pp. 363-373, 2009.
- _____. **Léon Rosenfeld's pioneering steps toward a quantum theory of gravity**. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 222, artigo n. 012052, 2010.
- Schweber, Sam. *et alii*. **Mesons and Fields: Volume I Fields**. Evanston: Row, Peterson, 1955.
- _____. **The empiricist temper regnant: Theoretical physics in the United States, 1920- 1950**. *Historical Studies in Physical and Biological Sciences*, v. 17, n. 1, pp. 55-98, 1986.
- _____. **QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga**. Princeton: Princeton University, 1994.
- _____. **The sources of Schwinger's Green's functions**. *Proceedings of the National Academy of Science (USA)*, v. 102, n. 22, pp. 7783-7788, 2005.
- Schwinger, Julian. **Quantum electrodynamics II**. *Physical Review*, v. 75, n. 4, pp. 651-679, 1949.
- _____. **On the Green functions of quantized fields. I**. *Proceedings of the National Academy of Science (USA)*, v. 37, pp. 452-455, 1951.
- _____. (ed). **Selected Papers on Quantum Electrodynamics**. New York: Dover, 1958.
- Seligman, Carl Bryce. **I: The Theory of Gravitational Interactions. II: The Interaction of Gravitation with Light**. Harvard University, PhD Thesis, 1950.
- Smolin, Lee. **Three roads to quantum gravity**. New York: Science Masters, 2002.
- Solomon, Jacques. **L'électrodynamique et la théorie des quanta**. Paris: Masson, 1931.
- _____. **Remarques sur la théorie du rayonnement**. *Journal de Physique et le Radium*, v. 4, n. 7, p. 368-387, 1933.
- _____. **Sur la définition du spin de l'électron**. *Journal de Physique et le Radium*, v. 5, n. 4, pp. 167-170, 1934.
- _____. **Gravitation et quanta**. *Journal de Physique et le Radium*, v. 9, n. 11, pp. 479-485, 1938.
- _____. **M. Gaston Bachelard et le «nouvel esprit scientifique»**. *La Pensée (Nouvelle Série)*, v. 2, p. 47-55, 1945.
- Stachel, John. **History of Relativity**. In: A. Pais *et alii*. **Twentieth Century Physics**. New York: IOP Publishing, 1995, pp. 249-356.
- Stachel, John. **The early history of quantum gravity**. In: B. R. Iyer & B. Bhawai (ed). **Black Holes, Gravitational radiation and the Universe**. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1998, pp. 524-534.
- _____. **Quantum Field Theory and Space-Time: Introduction**. In: Tian Yu Cao (ed). **Conceptual Foundations of Quantum Field Theory**. Cambridge: Cambridge University, 1999, pp. 166-175.
- Staley, Richard. **On the co-creation of classical and modern physics**. *Isis*, v. 96, n. 4, pp. 530-58, 2005.

- Tanoma, Scott. **Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope**. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, v. 35, n. 3, pp. 483-507, 2004.
- 't Hooft, Gerard. **The Pursuit of Quantum Gravity: Memoirs of Bryce DeWitt from 1946 to 2004**, by Cécile DeWitt-Morette [book review]. Foundations of Physics, v. 42, n. 5, pp. 685-687, 2012.
- Tournès, Ludovic. **Sciences de l'homme et politique les fondations philanthropique américaines en France au XXe siècle**. Versão preliminar disponível em halshs-00650461, 10 Dec 2011.
- Valéry, Paul. **Regards sur le monde actuel et autres essais**. Paris: Gallimard, 1998.
- Vila Valls, Adrien. **Louis de Broglie et la Diffusion de la Mécanique Quantique en France (1925-1960)**. Thèse de Doctorat en Histoire, Philosophie et Didactique des Sciences, Université Lyon I, Lyon, França, Novembro 2012.
- Vilkoviski, Gregory. **The Gospel According to DeWitt**. In: S. M. Christensen (ed). **Quantum Theory of Gravity: essays in honor of the 60th birthday of Bryce S. DeWitt**. Bristol: Adam Hilger, 1984, pp. 169-209.
- Weinberg, Steven. **Bryce Seligman DeWitt, 1923-2004**. Biographical Memoir, National Academy of Science, 2008.
- Wheeler, John Archibald. **Field and Charge Measurements in Quantum Theory**. In: A. Pais. **Developments in the Theory of the Electron**. Princeton: Institute for Advanced Studies, 1948, pp. 42-45.
- _____. **Geons**. Physical Review, v. 97, n. 2, pp. 511-536, 1955.
- _____. **Geometrodynamics**. New York: Academic Press, 1962.
- Wheeler, John Archibald & Feynman, Richard Phillips. **Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action**. Reviews of Modern Physics, v. 21, n. 3, pp. 425-433, 1949.
- Wigner, Eugene. **Concept of Observation in Quantum Mechanics**. In: F. Werner (ed). **Conference on the Foundations of Quantum Mechanics**. Xavier University, Cincinnati, 1 a 5 de outubro de 1962.
- Yang Yeh, Hsing. **Measurability of Gravitational Field Strengths**. Nuovo Cimento, suplemento al volume XXI, n. 2, series 10, pp. 101-156, 1961.
- Yang, Chen Ning. **Julian Schwinger**. In: Ng, Y. Jack (ed). **Julian Schwinger: The Physicist, the Teacher, and the Man**. Singapore: World Scientific, 1996, pp. 175-180.
- Zangara, Adriana. **Voir l'histoire: Théories anciennes du récit historique**. Paris: Vrin, 2007.