

ORIENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PARA O ESTUDO DA FILOSOFIA DA FÍSICA QUÂNTICA

Oswaldo Pessoa Jr. (DF)

1. Apresentação

A filosofia da física quântica é uma área excitante da filosofia da ciência, pois contempla um mundo de comportamento estranho que existe na escala dos átomos. Em poucas palavras, o que se constata na escala quântica é que a matéria se comporta de maneira ondulatória, mas ao mesmo tempo toda medição de sistemas quânticos fornece sinais discretos, pontuais, quantizados. Sistemas quânticos apresentam também um holismo que não existe em escalas mais clássicas: assim, uma molécula pequena como a amônia não deve ser pensada como um monte de bolinhas atômicas grudadas, mas mais como uma geleia que pode adquirir simetria esférica na ausência de forças externas.

Nesta última frase, porém, aludi a uma situação sem a presença de um observador, o que só é aceitável para interpretações realistas da teoria quântica. Ocorre, porém, que as interpretações dominantes são antirrealistas, mesmo hoje após o fim da hegemonia da interpretação ortodoxa de Bohr, Pauli e Heisenberg. Voltando ao comportamento da molécula de amônia, se considerarmos agora moléculas maiores, como a de sacarose, imersas em solução, elas terão seu comportamento quântico inibido pelo meio ambiente (a água relativamente quente), indicando a passagem da escala quântica para a clássica. Esta fronteira entre quântico e clássico é um problema em aberto, e não se sabe qual o maior objeto capaz de permanecer em superposição quântica: certamente gatos não são capazes. Relacionado ao holismo supramencionado está a propriedade de não-localidade, que qualquer interpretação realista tem que aceitar (mas não as antirrealistas). Outro aspecto que sempre capturou a imaginação popular é o princípio de incerteza.

Como um aluno deve se iniciar nesta fascinante área? Claro que fazer um curso de Física ajuda muito, mas é possível conhecer os conceitos e os debates filosóficos da física quântica a partir de uma vasta literatura de divulgação. Incluídas nesta literatura estão vários best-sellers que exploram o misticismo quântico, a tese de que os mistérios da física quântica estariam intimamente relacionados com os mistérios da mente e da espiritualidade. Esta conexão entre quântica e espiritualidade é negada pela maioria dos físicos, e não será explorada aqui.

2. Dez textos iniciais em língua portuguesa

Começarei com dez textos em língua portuguesa. Para o iniciante, é recomendável ler uma obra de divulgação científica que faça uma introdução conceitual à teoria quântica, que não entre muito nas questões filosóficas. Nesta primeira categoria, mencionarei três livros. (Nota: uso os termos “teoria quântica”, “física quântica” e “mecânica quântica” como sinônimos.)

- 1) FREIRE JR., Olival & CARVALHO NETO, Rodolfo A. (1997), **O universo dos quanta** (paradidático), FTD, São Paulo. Uma boa introdução aos aspectos históricos e conceituais da física quântica, dirigida para alunos do Ensino Médio. O livro traça um panorama inicial da história da física, salientando questões como o determinismo da física clássica. Examina então a história da velha teoria quântica (1900-25), desembocando na mecânica quântica desenvolvida por Heisenberg, Schrödinger, Dirac, entre outros. Aborda-se o impacto científico, tecnológico e filosófico da teoria. Apesar de seu sucesso preditivo, ressalta-se que a teoria não goza de consenso interpretativo, e assim são estudadas a interpretação ortodoxa e algumas de suas rivais.
- 2) HERBERT, Nick (1989), **A realidade quântica**, trad. M.C. Moura, Francisco Alves, Rio de Janeiro. Herbert é um dos expoentes do misticismo quântico de raízes hippie-californianas. Este livro, porém, é bastante sóbrio, e ele apresenta de maneira didática diversas interpretações da teoria quântica (oito “realidades quânticas”), chegando até a discussão sobre teorema de Bell e não-localidade. O livro foi lançado em inglês em 1985, e fez parte de uma leva de bons livros de divulgação com viés filosófico, em que se destacaram mais três: POLKINGHORNE, J. (1985), *The quantum world*, Princeton University Press; RAE, A.I.M. (1986), *Quantum theory: illusion or reality?* Cambridge University Press; SQUIRES E.J. (1986), *The mystery of the quantum world*, Taylor & Francis, New York. Desta leva, mas um pouco menos preciso, saiu em Portugal o livro de GRIBBIN, J. (1989), *À procura do gato de Schrödinger*, Presença, Lisboa (original 1984).
- 3) PENROSE, Roger (1994), **A nova mente do rei**, Campus, Rio de Janeiro, cap. 6. Penrose é um grande físico-matemático e está entre os melhores divulgadores da física. Este livro finaliza com suas ideias controvertidas sobre a mente humana, cujo mistério, segundo ele, estaria relacionada com os mistérios da física quântica. Antes disso, porém, ele apresenta três capítulos (5,6,7) que resumem de maneira inigualável diversas teorias fundamentais da física

do final do século XX, e o capítulo 6, “Mágica quântica, mistério quântico”, é uma excelente introdução à teoria quântica e a algumas questões filosóficas.

Após um primeiro contato com aspectos conceituais da teoria quântica, uma segunda etapa é adentrar as questões filosóficas a partir do ponto de vista da interpretação ortodoxa.

- 4) HEISENBERG, Werner (1996), **A parte e o todo**, trad. Vera Ribeiro, Contraponto, Rio de Janeiro. Orig. em alemão: 1969. Versão de Portugal: **Diálogos sobre física atômica** (1975), Verbo, Lisboa. Este é um livro de reminiscências do pioneiro da mecânica quântica, em que ele reconta diversos diálogos e episódios de sua carreira, entremeados com montanhismo. No cap. 3 relata suas discussões operacionistas com Wolfgang Pauli e seu primeiro encontro com Niels Bohr, para quem a linguagem, ao se referir a átomos, deve ser usada como na poesia. O cap. 5 relata a sua maior descoberta, a de que a chave da nova mecânica quântica era utilizar variáveis que não comutam (ou seja, a ordem dos fatores pode alterar o produto). Descreve também seu célebre encontro com Albert Einstein, que lhe ensinou que “é a teoria que decide o que podemos observar”. Outra joia histórica é apresentada no cap. 6, com a discussão entre Bohr e Erwin Schrödinger. Nos caps. 12 a 16, descreve sua decisão de permanecer na Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial. O livro está recheado de discussões e opiniões filosóficas e religiosas, como a discussão no cap. 10 com von Weizsäcker e Grete Hermann sobre o kantismo na física quântica, terminando com um retorno do autor ao platonismo: “no começo era a simetria”.
- 5) BOHR, Niels (1995). **Física atômica e conhecimento humano**, trad. Vera Ribeiro, Contraponto, Rio de Janeiro. Bohr foi o apóstolo principal da interpretação ortodoxa da teoria quântica, e o conceito central em sua visão de mundo é o de complementaridade. Este livro traz artigos escritos entre 1932 e 1957 sobre esta ideia, de que um objeto quântico, como um átomo, não pode ser inteiramente compreendido dentro de um “quadro único”, mas necessita de descrições mutuamente excludentes, como “onda” e “partícula”, que juntas se complementam para descrever o objeto. O sucesso da interpretação ortodoxa estimulou Bohr a estender a noção de complementaridade para outros campos do conhecimento. Na biologia, haveria uma complementaridade entre análise física de seres vivos e a própria manutenção da vida, tese que acabaria abandonando em 1962. Na psicologia, entre introspecção consciente (pensamento) e emoções (sentimento), retomando as ideias de William James; e também na

linguística (p. 65) e na ética (p. 103). O artigo mais importante no livro é “O debate com Einstein sobre problemas epistemológicos na física atômica”, escrito em 1949.

- 6) VON WEIZSÄCKER, Carl F. (1945), **Para uma concepção física do universo**, trad. L.C. Moncada, Atlântida, Coimbra. Este é um livro raro que ainda pode ser encontrado em sebos do Brasil. Lançado em Portugal como parte do esforço de guerra alemão, apresenta diversos textos filosóficos sobre a teoria quântica. Carl von Weizsäcker foi aluno de Heisenberg, tornando-se um astrofísico reconhecido e também um grande filósofo da física. Passou um mês em São Paulo em 1952, participando da organização do Instituto de Física Teórica. O livro conta com cinco artigos, sendo o mais interessante “A mecânica quântica e a filosofia de Kant”. Traz também um estudo sobre o princípio de conservação de energia e um pequeno histórico da concepção do infinito na filosofia da natureza. Ao longo do livro, deixa claro a sua tese de que o que teria sido perdido com a teoria quântica é a “objetivabilidade”, ou seja, (na linguagem da filosofia da ciência atual) o realismo. Das categorias kantianas, a que deve ser abandonada não seria a causalidade, mas a de substância.

Passada esta etapa, a próxima empreitada é conhecer as críticas feitas pelas interpretações concorrentes à ortodoxia. A figura central nos debates é David Bohm, físico estadunidense que trabalhou na USP entre 1952 e 55.

- 7) FREIRE JR., Olival (1999), **David Bohm e a controvérsia dos quanta**, Coleção CLE 27, Unicamp. Esta é a tese de doutorado de Olival, defendida no Depto. de História da FFLCH. Apresenta de maneira cronológica a evolução das ideias de Bohm, salientando aspectos históricos e filosóficos. Analisa a recepção da interpretação causal do físico estadunidense, identificando críticas e apoios científicos ou epistemológicos. Conclui que a visão de Bohm e de Broglie foi rejeitada pela maioria dos físicos por não poder ser estendida ao domínio relativístico e não gerar novas previsões. Utiliza em seu estudo a metodologia dos programas de pesquisa de Imre Lakatos, e explora também a relação entre o marxismo e controvérsia dos quanta.

- 8) SELLERI, Franco (1990), **Paradoxos e realidade: ensaios sobre os fundamentos da microfísica**, trad. A. Vox & L. Pankovic, Fragmentos, Lisboa. Selleri foi um dos mais salientes críticos da interpretação ortodoxa da teoria quântica, desde a época (final dos anos 60) em que isso era associado à ideologia política. Este livro (orig. italiano de 1987) é bem escrito e discute diversos experimentos, colocando-se em uma posição realista, próximo da visão de Louis de

Broglie e David Bohm. Vale notar, porém que as especulações sobre a possível detecção de ondas vazias, envolvendo inclusive o físico português José Ramalho Croca (p. 109), acabaria sendo dissipada em um experimento de Wang, Zou & Mandel (1991). Croca, porém, não aceita esse resultado, como se vê em seu livro com Rui Moreira, *Diálogos sobre física quântica*, Capax Dei, Rio de Janeiro, 2010.

Para finalizar nossa lista inicial de dez, duas referências que exploram aspectos históricos do nascimento da física quântica:

- 9) HOLTON, Gerald (1984), “As raízes da complementaridade”, trad. D.O. Mendes, **Humanidades** 2(9): 49-71. Um estudo aprofundado mas de fácil leitura das raízes do pensamento de Niels Bohr, que Holton mostra ter sido bastante influenciado (mesmo que indiretamente) por William James, além de pelos filósofos dinamarqueses Harald Høffding e Søren Kierkegaard.
- 10) FORMAN, Paul (1983). “A cultura de Weimar, a causalidade e a teoria quântica, 1918-1927: a adaptação de físicos e matemáticos alemães a um ambiente intelectual hostil”, trad. C.W. Abramo, **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, *suplemento 2*: 3-98. Longo artigo escrito em 1971 que argumenta que o perfil interpretativo da teoria quântica que se desenvolveu na Alemanha do Entre Guerras foi fortemente influenciado pelo contexto sociocultural da época. A adaptação do conhecimento ao ambiente intelectual hostil da Cultura de Weimar teria levado ao abandono do conceito de “causalidade”. Essa tese gerou um grande debate na historiografia da ciência, que pode ser pesquisado sob a rubrica “Forman thesis”.

Esta é minha lista comentada dos dez mais da língua portuguesa, para servir como guia inicial ao aluno interessado em filosofia da física quântica, mas há muito mais chão a ser explorado. Apresento a seguir uma bibliografia basicamente em português, com alguns itens importantes em inglês.

3. Introdução ao debate filosófico e conceitual (em português):

- 11) ARENHART, Jonas R.B. & KRAUSE, Décio (2012), “Indistinguibilidade, não reflexividade, ontologia e física quântica”, *Scientiae Studia 10(1)*: 41-69. Décio e Jonas seguem a trilha inaugurada pelo lógico Newton da Costa e exploram de maneira original o uso de lógicas não-clássicas para fundamentar a teoria quântica.
- 12) CHIBENI, Sílvio S. (1997), *Aspectos da descrição física da realidade*, Coleção CLE 21, Unicamp. Baseado na tese de doutorado deste filósofo da ciência da Unicamp, apresenta cuidadosamente o debate filosófico relacionado ao teorema de Bell, dando muita atenção também à visão de David Bohm.
- 13) FREIRE JR. O. PESSOA JR., O. & BROMBERG, J.L. (orgs.) (2010), *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*, Ed. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande; Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2010. Baseado em um “workshop” realizado em Campina Grande em 2008, apresenta diversos textos interessantes de filosofia, história e implicações culturais da física quântica. Ganhou o 1º lugar no Prêmio Jabuti de 2011, na categoria “Ciências Exatas”.
- 14) KAUARK-LEITE, Patrícia (2013). “Redefinindo a curvatura do arco: aspectos transcendentais da racionalidade quântica”. *Analytica 17*: 59-78. Patrícia defendeu uma tese premiada na França sobre as interpretações kantianas da teoria quântica, e neste artigo ela faz uma síntese da questão.
- 15) PATY, Michel (1995), *A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da física contemporânea*, Trad. M.A. Leite de Barros, EDUSP, São Paulo. Orig. em francês: 1988. Michel Paty é um físico e filósofo francês que visita o Brasil desde a época da intervenção da Universidade de Brasília em 1968, que ele presenciou. Foi um dos primeiros a se debruçar sobre o significado filosófico do teorema de Bell, nos anos 70, e escreveu muito sobre física quântica, Einstein e outros temas de história e filosofia da física. Este é um livro filosoficamente denso que examina aspectos da descrição física dos átomos no século XX.
- 16) ZEILINGER, Anton (2005), *Face oculta da natureza*, Globo, Rio de Janeiro. Este físico experimental austríaco é um dos grandes expoentes da área de informação quântica, que floresceu nos anos 1990 em parte a partir dos trabalhos pioneiros de John Bell. Este livro de

divulgação é escrito em meio às pesquisas de ponta de Zeilinger para testar as desigualdades de Bell, o teletransporte quântico, entre outros efeitos singulares da física quântica.

4. Originais e aprofundamentos dos debates filosóficos:

- 17) BELL, John S. (1966), “Sobre o problema das variáveis ocultas em mecânica quântica”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (série 3) 2(2) (1992) 243-57. Análise definitiva das provas de impossibilidade da teoria quântica, submetida em 1964 por John Bell, mas só publicada em 1966. Este estudo trilhou o caminho para que Bell, no artigo seguinte, apresentasse sua famosa desigualdade.
- 18) BOHM, David (2008), *Totalidade e a ordem implicada*, trad. T. Lorent, Madras, São Paulo. Publicada em inglês em 1980, tem uma tradução anterior pela Cultrix, 1992. Coletânea de artigos, entre 1962 e 1976, do maior rival da interpretação ortodoxa, e que trabalhou na USP no período 1952-55, fugido do macartismo. Os textos são notáveis por mostrarem a evolução do pensamento de Bohm, que não satisfeito em sua interpretação causal de 1952, desenvolveu ao longo dos anos uma interpretação estocástica com Jean-Pierre Vigié, e posteriormente sua abordagem do holomovimento (ordem implicada).
- 19) BOHR, Niels (1928), “O postulado quântico e o recente desenvolvimento da física atômica”, em *Fundamentos da Física 1* (Simpósio David Bohm), Ed. Livraria da Física, 2000, pp. 135-59. Clássico texto do físico dinamarquês, apresentando de maneira muito coerente a primeira versão de sua interpretação da complementaridade.
- 20) BROWN, Harvey R. (1981), “O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica”, em *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 2, pp. 51-89. Um artigo bastante denso sobre os fundamentos da teoria quântica, escrito pelo filósofo da física neozelandês, que na época trabalhava na Unicamp, antes de ser contratado como professor em Oxford.
- 21) D’ESPAGNAT, Bernard (1979), “The quantum theory and reality”, *Scientific American* 241 (nov.): 128-40. Continua sendo um dos melhores artigos de introdução ao teorema de Bell, escrito pelo importante filósofo da física francês. Delineia as três hipóteses que levam à desigualdade de Bell – realismo, localidade e indução. O teorema de Bell é a tese de que, face aos

resultados experimentais, pelo menos uma dessas hipóteses (caras à física clássica) tem que ser abandonada pela física contemporânea.

22) EINSTEIN, PODOLSKY & ROSEN (1935) & BOHR (1935), “A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?”, trad. C.W. Abramo, em *Cadernos de História e Filosofia da Ciência 2* (1981), pp. 90-6 e 97-106. Este par de artigos está entre os mais importantes dos fundamentos da física. De um lado, Albert Einstein, já morando em Princeton, associa-se com Boris Podolsky e Nathan Rosen para argumentar que a teoria quântica é incompleta, ou seja, há elementos da realidade que não são descritos pela teoria. A resposta de Niels Bohr foi vista na época como encerrando o debate, apresentando um punhado de argumentos contra os pressupostos usados por EPR. Mas a controvérsia reapareceria com força no final da década de 60, e hoje o artigo de EPR está entre os mais citados da história da física.

23) SOLVAY, Congresso de (1927), “Discussão geral das novas ideias formuladas”, em *Fundamentos da Física 2* (Simpósio David Bohm), Ed. Livraria da Física, 2001, pp. 139-72. Excelentes discussões entre físicos com preocupações de entender o significado da nova teoria quântica.

24) WHEELER, J.A. & ZUREK, W.H. (orgs.) (1974), *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press. Grande coletânea de textos sobre questões filosóficas da mecânica quântica, com pequenos comentários dos organizadores. Salienta os textos clássicos.

5. História da Física Quântica:

25) FREIRE, Olival (2015). *The quantum dissidents: rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)*. Springer. O renomado historiador da ciência jequiense apresenta neste livro diversos textos publicados em sua carreira sobre a história dos debates interpretativos na física quântica, amarrando-os com uma nova introdução e conclusão. Olival foi um dos primeiros historiadores profissionais a estudar o rico período da “controvérsia dos quanta” após 1960. Ele e seus alunos da UFBA e da UEFS obtiveram muitas informações inéditas pesquisando arquivos de correspondência espalhados na Europa, Estados Unidos e Brasil. Aguardamos a tradução do livro para o português.

- 26) JAMMER, Max (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*, McGraw-Hill, New York. Clássico livro de história da física quântica, sem entrar muito nas questões filosóficas, que seriam aprofundadas no livro indicado mais abaixo. O único ponto considerado mal tratado é a análise feita do trabalho de Max Born.
- 27) SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL – Coleção Gênios da Ciência – *Quânticos* (2006), textos de R.A. Martins, P.S. Rosa, S.L. Machado, O. Freire Jr., F. Freitas, etc. Muito boa obra de divulgação histórica, dirigida pelo historiador Roberto de Andrade Martins, da Unicamp, e enfocando as biografias dos pioneiros teoria quântica. Infelizmente é de difícil acesso. Martins publicou com seu ex-aluno Pedro Rosa um livro detalhado sobre a história da teoria quântica velha, indo até Louis de Broglie: *História da teoria quântica*, Editora Livraria da Física, São Paulo, 2014.

6. Tratamentos introdutórios mais matemáticos:

- 28) D'ESPAGNAT, Bernard (1976), *Conceptual foundations of quantum mechanics*, 2^a ed., Benjamin, Reading (EUA). Um clássico dos fundamentos da teoria quântica, em especial do problema da medição. Sendo uma segunda edição, o autor pôde corrigir vários defeitos da edição original. A leitura é um pouco difícil.
- 29) ISHAM, Chris J. (1985), *Lectures on quantum theory*, Imperial College Press, Londres. Uma boa e curta introdução matemática à teoria quântica, incorporando as principais questões dos fundamentos filosóficos, como as provas de impossibilidade de variáveis ocultas. Sua leitura exige mais preparo matemático do que a do livro de Gillespie. Contém alguns comentários filosóficos, inspirados no ouroboros, a cobra que morde o rabo.
- 30) GILLESPIE, Daniel T. (1970). *A quantum mechanics primer*, ITC, Scranton (PA). Este modesto livro é uma excelente indicação para aquele aluno com uma formação matemática mínima que deseja entender o formalismo matemático básico da mecânica quântica, tendo em vista estudar seus problemas de fundamentos.

- 31) JAMMER, Max (1974), *The philosophy of quantum mechanics*, Wiley, Nova Iorque. Livro de cabeceira de todo filósofo da teoria quântica, varre quase tudo que foi escrito sobre o assunto até 1970. Infelizmente, o livro foi escrito no meio da revolução conceitual propiciada pelo teorema de Bell, e o autor não pôde dar um balanço adequado desta revolução.
- 32) PESSOA JR., Osvaldo (2006). *Conceitos de física quântica*, Livraria da Física, São Paulo. Livro do presente resenhista, discutindo conceitos, problemas filosóficos e experimentos, indicado como complemento para alunos de graduação de física. Textos mais introdutórios do autor foram escritos para o site Vya Estelar, e estão coligidos em: <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/Vya-Quantica-Tudo.pdf>
- 33) PINTO NETO, Nelson (2010). *Teoria e interpretações da mecânica quântica*, CBPF/Livraria da Física, Rio/São Paulo. Físico do Centro Brasileiro de Pesquisas Física, no Rio de Janeiro, o autor apresenta um resumo matemático das principais interpretações propostas atualmente para a teoria quântica. Voltada para graduados em física, o autor se destaca por criticar a interpretação ortodoxa e nutrir simpatia pela teoria de Louis de Broglie e David Bohm, que aplicou de maneira pioneira em seu trabalho em cosmologia quântica. O último capítulo resume bem as teses e espírito do livro.
- 34) REDHEAD, Michael (1987), *Incompleteness, non-locality and realism*, Clarendon, Oxford. Uma introdução filosófica didática e aprofundada dos problemas levantados pelo teorema de Bell. Sendo escrito por um filósofo da ciência, carrega bastante nos conceitos e apresenta o formalismo matemático sem pressupor que o leitor seja um físico.