

PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE EM LIVROS DIDÁTICOS DO ENSINO SUPERIOR: UMA DISCUSSÃO À LUZ DA SOCIOLOGIA SIMÉTRICA DA EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS

COMPLEMENTARITY PRINCIPLE IN UNDEGRADUATE TEXTBOOKS: A DISCUSSION SUPPORTED BY THE SYMMETRICAL SOCIOLOGY OF SCIENCE EDUCATION

Jaíne Alvarenga da Cruz¹, Nathan Willig Lima²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física, jaine.ac@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física/Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Nathan.lima@ufrgs.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é identificar os diferentes elementos que compõem o Princípio da Complementaridade proposto por Niels Bohr e analisar se tais elementos estão presentes em textos didáticos de Física Quântica do Ensino Superior, o que pode ser uma medida de estabilização ontológica do princípio de acordo com as discussões da Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. Para tanto, analisamos artigos originais de Bohr e a literatura especializada, adotando a diferenciação de Weizsäcker em três tipos de complementaridade: dualidade onda-partícula, paralela e circular. No quadro da Sociologia Simétrica da Educação em Ciências, cada tipo pode ser entendido como um diferente envelope de proposições, que caracteriza uma determinada rede sociotécnica e um conjunto específico de *performances*. Na sequência, investigamos quais dessas proposições da complementaridade estão presentes em trinta e quatro livros de Física Quântica do Ensino Superior. Nossos resultados apontam que 48% dos livros não falam de complementaridade, 36% dos livros falam de dualidade onda-partícula, 33% falam da dualidade paralela e apenas 9% falam da dualidade circular (soma-se mais do que 100% pois há livros que falam de mais de uma). Nenhum livro fala de implicações filosóficas. Tais resultados apontam que a Complementaridade parece não ter sido um conceito autonomizado na Física Quântica, e os livros que a apresentam reduzem seu significado original.

Palavras-chave: Complementaridade, Física Quântica, Livros Didáticos, Ensino Superior, Livro Didático

Abstract

The objective of this work is to identify the different elements that make up the Complementarity Principle proposed by Niels Bohr and to analyze whether these elements are present in undergraduate Quantum Physics textbooks, which can be a measure of ontological stabilization of the principle according to the discussions of the Symmetric Sociology of Science Education. In order to do so, we analyzed original articles by Bohr and the specialized literature, adopting Weizsäcker's differentiation in three types of complementarity: wave-particle, parallel and circular

duality. Within the framework of the Symmetric Sociology of Science Education, each type can be understood as a different envelope of propositions, which characterizes a specific socio-technical network and a specific set of performances. Then, we investigate which of these complementarity proposals are present in thirty-four Quantum Physics books in Higher Education. Our results show that 48% of the books do not speak of complementarity, 36% of the books speak of wave-particle duality, 33% speak of parallel duality and only 9% speak of circular duality (the sum is more than 100% because there are books that speak of more than one). No book speaks of philosophical implications. Such results indicate that Complementarity does not seem to have been an autonomous concept in Quantum Physics, and the books that present it reduce its original meaning.

Keywords: Complementarity, Quantum Physics, Textbooks, Undergraduate Physics

Introdução

É comum encontrarmos a concepção de que a Interpretação de Copenhague foi a proposição que se tornou hegemônica após a axiomatização da Teoria Quântica ao final da década de 20 (CARROL, 2019). De fato, a valorização da investigação filosófica na Física Quântica e do desenvolvimento de outras interpretações aparece como um fenômeno histórico tardio no desenvolvimento dessa Teoria (FREIRE JR, 2015). De acordo com Heisenberg (HEISENBERG, 1996), a Interpretação de Copenhague é baseada em três pilares: o princípio da incerteza, a interpretação probabilística de Born e o Princípio da Complementaridade.

Uma forma de avaliar a influência de uma determinada tese ou conceito na estrutura de uma teoria é verificando sua incorporação nos livros didáticos usados para formar cientistas, pois como já caracterizara Thomas Kuhn (KUHN, 1996), os cientistas aprendem os problemas exemplares, os domínios de sua disciplina e os métodos característicos através desses manuais de instrução.

O objetivo desse trabalho, portanto, é fazer um recorte do problema proposto e investigar, especificamente, a apresentação do Princípio da Complementaridade em livros didáticos de Física Quântica usados no ensino superior, avaliando sua relação com a concepção original de Bohr (1928, 1995a). De forma mais específica, ao longo do trabalho, trataremos das seguintes questões de pesquisa: a) O que Bohr entendia por Princípio da Complementaridade? B) Os livros de Física Quântica de ensino superior falam sobre o Princípio da Complementaridade? C) Quais componentes do pensamento de Bohr estão presentes nos livros didáticos e quais foram apagados?

Referencial Teórico Metodológico

Partimos do quadro teórico estabelecido pela Sociologia Simétrica da Educação em Ciências (LIMA *et al.*, 2018). De acordo com essa proposta, uma proposição científica é estabelecida pela rede sociotécnica que ela mobiliza e pelo conjunto de *performances* que ela atribui a determinado ator (humano ou não-humano). Ademais, toda proposição passa por um processo de estabilização, sendo modificado ao longo de tal trajetória, ou, até mesmo, podendo ser desestabilizado

(nesse caso, ao invés de ser considerado um fato, a proposição passa a ser considerada um artefato). Uma forma de analisar tal trajetória de estabilização é avaliando como os livros didáticos narram tal proposição (LIMA *et al.*, 2018). Mais especificamente, pode-se quantificar a presença de uma determinada proposição nos textos como uma medida de tal estabilização.

Metodologia

O estudo se trata de uma pesquisa qualitativa, apoiada nas premissas metodológicas da Sociologia Simétrica da Educação em Ciências (LIMA *et al.*, 2018). Os passos adotados foram os seguintes: foi feita, primeiramente, uma leitura de fontes históricas secundárias sobre o princípio da Complementaridade (JAMMER, 1966). Essa leitura foi realizada com o intuito de se obter uma primeira visão sobre o princípio da complementaridade, assim como para se identificar as fontes primárias relevantes sobre o assunto. Foram, então, estudados trabalhos originais do Bohr (1928, 1995a). Após uma primeira etapa de interpretação, foi identificado três proposições¹ diferentes de Complementaridade, como identificadas por Weizsäcker (JAMMER, 1966). Cada proposição enseja uma determinada visão de mundo, discorre sobre características específicas da natureza quântica e envolve um conjunto de experimentos. Fizemos uma caracterização de cada proposição (a qual é apresentada na próxima seção). Na sequência, interpretamos qualitativamente os enunciados de 34 livros didáticos do ensino superior sobre Princípio da Complementaridade (obtidos a partir de ementas de disciplina de Física Quântica e sugestões de professores de Física Quântica do ensino superior), identificando a qual dos três tipos de proposição eles se relacionavam. Por fim, quantificamos a importância relativa de cada proposição na amostra de livros analisada.

As Três Proposições do Princípio da Complementaridade

O princípio da complementaridade foi apresentado pela primeira vez por Niels Bohr em 1927 durante uma palestra em Como (JAMMER, 1966), e passou a ser aplicado em diversas situações na física quântica. De uma forma geral, o princípio diz respeito a impossibilidade de se obter informações sobre dois conceitos simultaneamente, sendo esses conceitos igualmente necessários para se descrever um fenômeno por completo. Entende-se que Bohr (1928) chegou à proposição do Princípio da Complementaridade após a publicação de Heisenberg sobre o Princípio da Incerteza. O físico alemão queria resolver, definitivamente, as confusões entre as concepções ondulatória e corpuscular. Como Bohr apontou, entretanto, a proposta de Heisenberg não só não resolvia o conflito como dependia dele. Assim, Bohr apresenta sua visão conectando o princípio da incerteza, a dualidade onda partícula e, como discute Weizsäcker, a complementaridade entre coordenação espaço-temporal e causalidade (JAMMER, 1966). Ou seja, pode-se identificar três proposições diferentes de Complementaridade (cada qual com sua rede sociotécnica e sua visão de mundo): a complementaridade onda-partícula refere-se à natureza dual da radiação e da matéria; a complementaridade paralela é aquela que diz respeito a duas grandezas de um mesmo modelo físico que não podem ser

¹ Proposição é o termo usado na Sociologia Simétrica para designar um actante, ou seja, um ator do mundo natural. A definição de uma proposição está relacionada à definição de uma rede sociotécnica e um conjunto de performances específico.

medidas com precisão absoluta, devido aos aparatos experimentais necessários para medi-las (Princípio da Incerteza); por fim, a circular refere-se à descrição causal e à coordenação espaço-temporal, isto é, a complementaridade entre a descrição feita por meio da equação de Schrödinger e por meio de uma mediação.

Para Niels Bohr (1995a), a aplicação do conceito de complementaridade não se limita a um ramo da física. No seu artigo *Filosofia Natural e Culturas Humanas*, por exemplo, ele nos mostra que as diferentes culturas humanas podem ser vistas como complementares entre si, de uma forma similar aos diferentes modelos físicos da luz, no sentido de que cada uma dessas culturas são um meio diferente pelo qual as potencialidades da vida humana podem se manifestar. Diferentemente do modelo físico, as culturas humanas não são absolutamente excludentes, pois dificilmente existe uma cultura em que possa se dizer ser plenamente autônoma. Encontramos também aplicações na área da biologia nos textos *Luz e Vida* (BOHR, 1995b) e *Biologia e Física Atômica* (BOHR, 1995c).

A estabilização do Princípio da Complementaridade em Livros Didáticos do Ensino Superior

Pode-se ter o indicativo da estabilização de uma proposição nos textos didáticos quantificando o número de vezes que ela é mobilizada em uma amostra de livros exemplares. Nesse sentido, observou-se que nenhum dos livros analisados deixa explícita a existência de mais de um tipo de complementaridade, apesar de, em alguns casos, haver exemplos de aplicação do princípio em situações diversas, dando a possibilidade de atribuir, durante a análise, mais de um tipo de complementaridade ao mesmo livro. Também não foi encontrada nenhuma discussão sobre as implicações filosóficas do princípio.

O seguinte trecho, por exemplo, apresenta a seguinte definição de complementaridade como dualidade onda partícula: “O princípio da complementaridade afirma que os modelos ondulatório e corpuscular da matéria ou da radiação se complementam mutuamente. Nenhum dos modelos pode ser utilizado exclusivamente para descrever adequadamente a matéria ou a radiação.” (SERWAY; JEWETT, 2010). No seguinte trecho, exemplificamos a complementaridade paralela: “Bohr, na sua interpretação da mecânica quântica, parte do princípio da complementaridade, segundo o qual existem duas classes de sistemas experimentais possíveis. Uma permite a determinação das relações de momento-energia e a outra das relações de espaço-tempo. O uso simultâneo de ambos é, em princípio, impossível.” (BLOKHINTSEV, 1964). Por fim, trazemos um exemplo de complementaridade circular: “Existe, como Bohr expressa, uma complementaridade entre a possibilidade de definir eventos em uma sequência de tempo e a possibilidade de descrevê-los causalmente (predições). A interação com uma parte do aparato, no qual pode nos ensinar algo sobre as propriedades do sistema num momento definido, irá conduzir a uma quebra abrupta na cadeia causal de eventos. Do ponto de vista de se construir conceitos físicos, esta interação pode ser considerada, em princípio, indescritível”. (KRAMERS, 1964).

Na tabela 1 encontra-se o resultado do mapeamento do conceito de complementaridade nos livros didáticos de ensino superior. Na coluna um encontra-se a data da primeira publicação do livro; na coluna dois encontram-se os autores do livro seguido da data da publicação da edição analisada; nas colunas três, quatro,

cinco e seis está sinalizada a proposição da complementaridade mobilizada pelo livro: 1: Onda-partícula. 2: Paralela. 3: Circular. NA: não se aplica.

Tabela 1: Resultado do mapeamento do conceito.

Ano da publicação	Livro	1	2	3	NA	Ano da publicação	Livro	1	2	3	NA
1928	(RICHTMYER; KENNARD, 1947)				x	1978	(FOCK, 1986)	x	x		
1935	(PAULING; WILSON, 1935)				x	1980	(LIBOFF, 2003)				x
1937	(C. KEMBLE, 1937)				x	1980	(PAULI, 1980)		x		
1938	(DUSHMAN, 1938)				x	1980	(SHANKAR, 1994)				x
1949	(I. SCHIFF, 1968)		x			1985	(SAKURAI, 1993)				x
1951	(BOHM, 1951)	x	x			1989	(GREINER, 2001)		x		
1958	(LANDAU; LIFSHITZ, 1977)				x	1991	(GOSWAMI, 1997)	x	x		
1961	(MERZBACHER, 1998)	x				1995	(GRIFFITHS, 2005)	x			
1961	(MESSIAH, 1961)	x	x	x		1998	(NUSSENZVEIG, 1998)				x
1961	(POWELL, 1961)				x	2000	(TIPLER; LLEWELLYN, 2012)				x
1962	(FONG, 1962)	x	x	x		2005	(COHEN-TANNOUDJI; DIU; LALOE, 2005)				x
1964	(BLOKHINTSEV, 1964)		x			2006	(CARUSO; OGURI, 2006)				x
1964	(KRAMERS, 1964)		x	x		2007	(YOUNG; FREEDMAN, 2007)	x			
1966	(GOTTFRIED; YAN, 2003)	x	x			2007	(HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007)				x
1968	(ALONSO; FINN; WILSON, 1968)				x	2009	(AULETTA; FORTUNATO; PARISI, 2009)	x			
1974	(EISBERG; RESNICK, 1985)	x				2010	(SERWAY; JEWETT, 2010)	x			
1974	(GASIOROWICZ, 2003)				x		TOTAL=33	12	11	3	16

A partir dos dados da tabela 1, pode-se inferir que 48% dos livros não falam de complementaridade, 36% dos livros falam de dualidade onda-partícula, 33% falam da dualidade paralela e apenas 9% falam da dualidade circular (soma-se mais do que 100% pois há livros que falam de mais de uma). Com isso, observa-se que o conceito de complementaridade é fortemente associado à dualidade onda partícula, reduzindo a discussão original de Bohr. Ademais, nenhum livro fala sobre implicações filosóficas do Princípio da Complementaridade.

Considerações Finais

Apresentamos um trabalho preliminar sobre a autonomização do Princípio da Complementaridade em livros didáticos. De acordo com o quadro teórico da Sociologia Simétrica da Educação em Ciências, nossa conclusão sobre os resultados apresentados é que o princípio não foi totalmente autonomizado, pois quase metade dos livros não fala de complementaridade, além de se perceber uma

privilegição da dualidade onda-partícula em detrimento das outras proposições. Percebe-se também uma desvalorização da dimensão filosófica proposta por Bohr, reduzindo a proposição à sua dimensão técnica.

Referências

ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J.; WILSON, Fred L. **Fundamental University Physics, Vol. 3: Quantum and Statistical Physics**. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1968.

AULETTA, Gennaro; FORTUNATO, Mauro; PARISI, Giorgio. **Quantum mechanics**. Cambridge: Cambridge university press, 2009.

BLOKHINTSEV, D. I. **Quantum mechanics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1964.

BOHM, David. **Quantum Theory**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1951.

C. KEMBLE, Edwin. **The Fundamentals Principles of Quantum Mechanics with elementary applications**. New York: McGraw-hill book company, 1937.

CARROL, Sean. **Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime**. New York: Dutton books, 2019.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. **Física Moderna origens clássica e Fundamentos Quânticos**. Amsterdam: Elsevier, 2006.

COHEN-TANNOUDJI, Claude; DIU, Bernard; LALOE, Franck. **Quantum Mechanics - Vol 1**. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

DUSHMAN, Saul. **The Elements of Quantum Mechanics**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1938.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles, 2nd Edition**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1985.

FOCK, V. A. **Fundamentals of Quantum Mechanics**. Moscow: Mir Publishers, 1986.

FONG, Peter. **Elementary Quantum Mechanics**. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1962.

FREIRE JR, Olival. **The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)**. Berlim: Springer, 2015.

GASIOROWICZ, Stephen. **Quantum Physics**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

GOSWAMI, Amit. **Quantum Mechanics**. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, Inc., 1997.

GOTTFRIED, Kurt; YAN, Tung-mow. **Quantum mechanics: Fundamentals**. 2. ed. Berlim: Springer, 2003.

GREINER, W. **Quantum Mechanics An Introduction**. 4. ed. Berlim: Springer, 2001.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Quantum Mechanics**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Education International, 2005.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamental of Physics Extended**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

HEISENBERG, Werner. **A Parte e o Todo**. São Paulo: contraponto, 1996.

I. SCHIFF, Leonard. **Quantum mechanics**. 3. ed. New York: McGraw-hill book company, 1968.

JAMMER, Max. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-hill book company, 1966.

KRAMERS, H. A. **Quantum Mechanics**. Mineola: Dover Publications, 1964.

KUHN, Thomas. **The structure of Scientific Revolutions**. 3. ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1996.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **Quantum Mechanics Non-relativistic Theory vol. 3**. 3. ed. Oxônia: Pergamon Press, 1977.

LIBOFF, Richard L. **Introductory Quantum Mechanics**. 4. ed. Boston: Addison Wesley, 2003.

LIMA, Nathan Willig *et al.* Um Estudo Metalinguístico sobre as Interpretações do Fóton nos Livros Didáticos de Física Aprovados no PNLDEM 2015: Elementos para uma Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa Em Educação Em Ciências**, v. 18(1), p. 331–364, 2018.

MERZBACHER, Eugen. **Quantum Mechanics**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.

MESSIAH, Albert. **Quantum mechanics volume I**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1961. v. 1

NIELS, Bohr. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. **Nature**, v. 121, n. 3050, p. 580–590, 1928.

NIELS, Bohr. **Física Atômica e Conhecimento Humano: ensaios 1932-1957**. Rio de Janeiro: contraponto, 1995 a.

NIELS, Bohr. Luz e vida. *In: Física Atômica e Conhecimento Humano ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro: contraponto, 1995 b. p. 5–16.

NIELS, Bohr. Biologia e Física Atômica. *In: Física Atômica e Conhecimento Humano ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro: contraponto, 1995 c. p. 17–28.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 4 Ótica Relatividade Física Quântica**. São Paulo: Editora Blucher, 1998.

PAULI, Wolfgang. **General Principles of Quantum Mechanics**. Berlim: Springer-verlag, 1980.

PAULING, Linus; WILSON, E. Bright. **Introduction Quantum Mechanics with Applications to Chemistry**. New York: McGraw-hill book company, 1935.

POWELL, John. **Quantum Mechanics**. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1961.

RICHTMYER, F. K.; KENNARD, E. H. **Introduction to Modern Physics**. 4. ed. New York: McGraw-hill book company, 1947.

SAKURAI, J. J. **Modern quantum mechanics, 1993 rev. ed.** Revised ed. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**. 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2010.

SHANKAR, R. **Principles of Quantum Mechanics**. Nova Iorque: Plenum Press, 1994.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Modern Physics**. 6. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2012.

YOUNG, H.; FREEDMAN, R. **University physics with modern physics**. 12. ed. Boston: Pearson Addison Wesley, 2007.