

Epistemologia em Física

Epistemology in Physics

Eleonoura Enoque da Silva*

Resumo: Neste artigo iremos explorar alguns aspectos epistemológicos da mecânica quântica, com o objetivo de discutir alguns limites na linguagem da mecânica quântica e indicar abordagens algébrica, conjuntista e categorial para o tratamento dessa linguagem.

Palavras chaves: Epistemologia. Física. Lógica.

Abstract: In this article we will explore some epistemological aspects of quantum mechanics, in order to discuss some limits on the language of quantum mechanical and indicate approaches, algebraic, set-theoretical and categorial for the treatment of this language.

Keywords: Epistemology. Physics. Logic

Em 1900, no Segundo Congresso Internacional de Matemática, em Paris, o matemático alemão David Hilbert apresentou uma lista com 23 problemas, que, segundo ele, deveriam ser motivo de investigação ao longo do século que se iniciava. De fato, muito do que se fez em matemática no século XX teve como foco os problemas formulados por Hilbert. Mas, ainda neste século XXI, restam 6 problemas em aberto, inclusive o 6º problema da lista de Hilbert, que perguntava por uma formulação axiomática para as teorias da física.

Nesse sexto problema, a ênfase está muito mais em estabelecer uma filosofia da física do que em enunciar uma axiomática da mecânica quântica. A característica deste problema consiste mais em delinear a concepção filosófica de Hilbert e a estruturação rigorosa dos métodos matemáticos que pudessem relacionar teorias físicas macroscópicas com a teoria fundamental

* Professora da UNICAP/PE, email: eleonouras@yahoo.com.br. O presente trabalho refere-se a uma introdução à minha tese de Doutorado em filosofia junto a UFPB.

de Newton no nível microscópico. E isto é explicitamente declarado por Hilbert no início da apresentação do sexto problema:

As investigações sobre os fundamentos da geometria sugerem o problema: tratar da mesma maneira, por meio de axiomas, as ciências físicas nas quais a matemática representa um papel importante; na primeira classe estão as teorias de probabilidades e da mecânica (...). Os físicos, com o desenvolvimento das suas teorias, às vezes são forçados pelos resultados de seus experimentos a construir novas hipóteses com os velhos axiomas, unicamente sobre esses experimentos ou sobre certas intuições físicas, uma prática na qual não é admissível o rigor lógico na construção da teoria. O desejo de provar a compatibilidade de todas as suposições parece ter importância, porque o esforço para obter tais provas sempre nos esforça mais efetivamente para uma formulação exata dos axiomas.¹

Após o Congresso de 1900, o sexto problema de Hilbert mudou o foco, e a busca passou a ser por uma axiomatização para a Teoria Quântica.

No final da década de 1920, a única área da física que ainda não tinha sido axiomatizada era a Mecânica Quântica (MQ), enfrentando problemas de ordem filosófica e técnica: se por um lado o aparente indeterminismo da mecânica quântica ainda não tinha sido explicado de maneira determinística, por outro, existiam duas teorias heurísticas independentes, a Matricial de Heisenberg² (1925) e a Ondulatória de Schrödinger³ (1926), para as quais não havia uma formulação teórica unificada.

No outono de 1927, no Congresso de Solvay, em Bruxelas, físicos do mundo inteiro criaram situações e experimentos para testar a consistência da teoria ondulatória de Schrödinger. Mas os experimentos, embora retratassem os princípios da MQ, tais como superposição⁴ e dualidade, eles possuíam paradoxos bizarros, e que atingiam os fundamentos do realismo e do empirismo da ciência moderna.

1 HILBERT, David. *Mathematical problems*. Bull. Amer. Math. Soc., Volume 33, Number 4 (1927), 437-479. Problem 6: *Mathematical treatment of the axioms of physics*, p. 454. [T.da A.].

2 HEISENBERG, Werner. *Física e Filosofia*. Trad. Jorge Leal Ferreira. 2ed. Brasília: Ed. UnB, 1987, 155p.

3 O maior problema para a interpretação de Schrödinger era que a função de onda, para duas ou mais partículas, teria que ser definida em um espaço com mais de três dimensões.

4 O princípio da “superposição” diz que um objeto pode estar em um estado físico indeterminado ou simultaneamente em estados físicos contrários; o princípio da “dualidade” afirma que um corpúsculo ora se comporta como onda ora como partícula.

Alguns desses físicos, na época ou mesmo depois, continuaram buscando um entendimento mais profundo desses princípios, produzindo experimentos cruciais para o desenvolvimento da mecânica quântica.

Em 1935, os físicos Einstein, Podolski e Rosen (EPR) criaram um experimento, que ficou conhecido como EPR, que questionava a “completude” da mecânica quântica; neste mesmo ano Schrödinger levantou o seu famoso paradoxo do gato a respeito do problema da interferência quântica em objetos macroscópicos (Zeilinger, 2010)⁵.

O experimento de EPR consistia em demonstrar que a Teoria Quântica (TQ), apesar de correta e consistente, era incompleta. Defender a completude TQ teria como consequência, estando o argumento EPR correto, a volta do conceito de simultaneidade na troca de informação entre dois sistemas físicos que, apesar de restrita a magnitudes microscópicas, inacessíveis para o experimentador, seria considerado inadmissível após a relatividade restrita. Por isso, os autores terminam o artigo com a seguinte afirmação: “somos forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física através das funções de onda não é completa”.⁶

Falar da incompletude da MQ significa dizer que existem elementos da realidade que não têm um correspondente na teoria. Mas afinal, como podemos entender esta inconsistência entre a teoria e a prática da MQ? Acreditamos que seja interessante procurar elucidar a linguagem da MQ por meio de outras abordagens, conforme será proposto mais adiante.

Ainda em 1935, o físico Erwin Schrödinger criou outro experimento, que ficou conhecido como paradoxo do gato de Schrödinger, que ilustrava o problema da interferência quântica em objetos macroscópicos. Nesse experimento, o autor, imaginou um sistema composto por um gato, preso dentro de uma caixa, e por átomo instável junto ao gato. O estado desse sistema composto é uma superposição de dois estados macroscópicos distintos do gato: gato vivo e gato morto⁷. Para realçar a ligação entre os dois subsistemas (gato mais átomo) que compõem o estado de superposição,

5 ZEILINGER, A. *Dance of the photons: from Einstein to quantum teleportation*. New York: Farrar, Strauss and Giroux, 2010.

6 EINSTEIN, Albert, PODOLSKY, Boris and ROSE, Nathan. Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review* 47, 777, 1935.

7 Essa situação surreal de uma superposição macroscópica de dois estados distintos pode ser evitada se lançamos mão de uma interpretação estatística da MQ. Esse “paradoxo” só ocorre se insistimos na visão de que um estado quântico descreve sistemas individuais.

Schrödinger usou o termo *Verschränkung*. Este termo foi traduzido do alemão para o inglês como *entanglement*, e em português, emaranhamento⁸.

Erwin Schrödinger, um dos pais da física quântica, chegou a dizer que o conceito característico da MQ é o de superposição. Ele afirmou que:

Quando dois sistemas, dos quais sabemos os estados por suas respectivas representações, entram em uma interação física temporária devido a forças conhecidas entre eles e quando após um certo tempo de influências mútuas, ou seja, entram em superposição os sistemas se separam novamente, eles não podem mais ser descritos como antes, atribuindo a cada um deles uma representação própria. Eu não diria que esta é uma, mas a característica da mecânica quântica (grifos no original).⁹

O princípio da superposição afirma que a matéria pode existir simultaneamente em dois estados contrários e bem definidos. O emaranhamento, surge ao aplicarmos o princípio da superposição a sistemas físicos compostos¹⁰ porque não é possível decompor o estado do sistema em seus estados individuais, como por exemplo, pares de fótons emaranhados. A respeito disso, Bas van Fraassen¹¹ diz que qualquer teoria física deve permitir a representação de sistemas compostos e fornecer alguma direção sobre como o estado do sistema todo está relacionado com o estado das partes.

Ainda na década de 1930, John von Neumann, matemático húngaro, queria descobrir o que a teoria matricial de Heisenberg e a teoria ondulatória de Schrodinger tinham em comum e, através de uma aproximação matemática, aspirava encontrar uma nova teoria mais rigorosa e fundamental.

8 Dizemos que um estado de um sistema quântico composto está emaranhado quando não é possível decompor o estado do sistema em seus estados individuais.

9 “When two systems, of which we know the states by their respective representation, enter into a temporary physical interaction due to known forces between them and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described as before, viz., by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that one but rather the characteristic trait of quantum mechanics”. SCHRÖDINGER, Erwin. Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol 31 (4), October 1935, p. 555.

10 Intuitivamente sabemos que os sistemas são compostos de outros. Um sólido ou um gás é composto de moléculas, moléculas de átomos, átomos de partículas elementares.

11 FRAASSEN, Bas C. van. *Quantum Mechanics: an empiricist view*. EUA: Clarendon, 1991.

Em 1932, ele publicou a obra intitulada *Fundamentos Matemáticos da Mecânica Quântica*¹², na qual ele apresentou, pela primeira vez, a teoria quântica em termos de postulados, propondo assim uma “axiomatização” da teoria, que ainda hoje é a mais aceita pelos físicos.

Além disso, em 1936, juntamente com Garrett Birkhoff, von Neumann propôs uma interpretação da teoria quântica do ponto de vista da lógica

No artigo *The Logic of Quantum Mechanics*¹³, os autores afirmam:

Um dos aspectos da teoria quântica que atraiu maior atenção diz respeito à novidade das noções lógicas que a teoria pressupõe [...] O objeto deste trabalho será descobrir que estruturas lógicas podemos esperar encontrar em teorias físicas que, como a mecânica quântica, não obedecem à lógica clássica.

As noções lógicas que os autores se referem são representações de algumas proposições da teoria quântica, em uma estrutura algébrica de reticulados, que ficou conhecida como lógica quântica.

Vale ressaltar que quando se fala em uma teoria científica, pensamos de início sobre a sua linguagem; conceitos, leis e explicações. Por isso, para falarmos da teoria quântica, devemos pelo menos, por ora, esboçar¹⁴ a sua linguagem, conceitos e princípios básicos (em forma de axiomas ou de postulados)

Para compreender a linguagem da MQ é preciso conhecer alguns pré-requisitos matemáticos básicos, tais como, estado do sistema, espaço de Hilbert, vetores estados e operadores¹⁵. O estado quântico de um sistema, ou seja, as informações sobre o sistema é representado em um espaço vetorial complexo, chamado espaços de Hilbert, denotado por H ; as grandezas observáveis, como posição, velocidade e momento, são representadas por operadores¹⁶.

12 VON NEUMANN, John. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Trad. Robert T. Beyer. London: Princeton University Press, 1955. O original foi publicado em alemão “*Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*”, Berlin, J. Springer, 1932.

13 BIRKHOFF, Garrett and VON NEUMANN, John. *The Logic of Quantum Mechanics*. *The Annals of Mathematics*. v. 37, n. 4, 1936, p. 823-843

14 Esboçar a linguagem devido à complexidade do arcabouço teórico do seu formalismo matemático.

15 COHEN-TANNOUDJI, C., DIU, D. and LALÖE, F. *Quantum Mechanics*. v.1. New York: Wiley, 1977, 847p.

16 Um operador é um objeto matemático que, agindo em qualquer vetor, como dos espaços de Hilbert, H , transforma-o em outro vetor do mesmo espaço.

No formalismo da MQ moderna¹⁷, na notação de Dirac, os estados de um determinado sistema físico – chamados de vetores estados – são indicados por um símbolo num colchete ângulo denotados por $|\psi\rangle$, chamados vetores “ket”. Para cada vetor ket, podemos atribuir um vetor estado dual (que é o conjugado do ket), denotado pelo símbolo $\langle\psi|$, chamado vetor “bra”. Esses símbolos passam a indicar os estados quânticos do sistema.

Atualmente, além desses problemas com a axiomatização e interpretação da MQ, temos ainda outros problemas de limites na linguagem da MQ em relação aos conceitos de identidade e indistinguibilidade das partículas elementares, como elétrons, prótons, nêutrons, e etc., uma vez que não é possível distinguir uma coleção de elétrons, já que todos possuem as mesmas propriedades intrínsecas, como massa, spin, carga elétrica, etc. Para os físicos, (na MQ) “idênticos” significa o mesmo que indistinguível. No entanto, nos âmbitos da lógica e da matemática, os conceitos de identidade e indistinguibilidade são distintos.

Por isso, nas décadas de 1980 e 1990, lógicos brasileiros, como Newton da Costa¹⁸ e Décio Krause¹⁹, e lógicos italianos, como Dalla Chiara²⁰ e Toraldo di Francia²¹, desenvolveram teorias de quase conjuntos, numa lógica não reflexiva – a qual derroga o princípio da identidade da lógica clássica – com o fito de discutir o conceito de identidade e indistinguibilidade da mecânica quântica.

Em 1995²² examinamos essas teorias de quase conjuntos, e constatamos que o problema ainda permanecia, a saber, os objetos indistinguíveis não podem ser identificados, contados ou ordenados. Por isso,

17 SAKURAI, J. and NAPOLITANO, J. *Modern quantum mechanics*. New York: Addison-Wesley, 1985, 570p.

18 DA COSTA, N. C. A. *Ensaio sobre os Fundamentos da Lógica*. São Paulo: Hucitec-Edusp, 1980.

19 KRAUSE, D. *Não Reflexividade, Indistinguibilidade e Agregados de Wey*. Tese (Doutorado) em Filosofia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, Orientador Newton C. A. da Costa, 1990, 152p.

20 DALLA CHIARA, M. L. *Some foundational problems in mathematics suggested by physics*, *Synthese* 62, 1987, p.303-315.

21 DALLA CHIARA, M. L. and TORALDO DI FRANCA, G. *Individuals, Kinds and Names in Physics*, in G. Corsi et. al (eds.) *Bridging the gap: philosophy, mathematics, physics*, Boston Studies in the Philosophy of Science, v.140, 1993, p. 261-283.

22 SILVA, E. E. *Um estudo sobre a teoria dos quase conjuntos*. Dissertação (Mestrado) em Filosofia) do Programa de Pós-Graduação em Filosofia da UFPB, Orientador Décio Krause, 1995, 156p.

em outro trabalho²³, apresentamos uma forma lógica rigorosa de raciocinar sobre a linguagem da MQ que foi por meio da teoria das categorias.

Ao estudarmos a teoria quântica por uma via categorial, e não mais pela teoria de quase conjunto, nos foi dada a possibilidade da construção de um tipo de categoria que já incorpora, na sua própria linguagem, alguns dos conceitos e princípios básicos da MQ.

Apesar disso, ainda hoje, esforçamo-nos muito para compreender as abordagens linguísticas da MQ, não só do ponto de vista da lógica e da matemática, mas, sobretudo, da epistemologia. Porém, a Ciência Física, da qual naturalmente precisaríamos receber o maior suporte ou contribuição na exploração de tais conceitos e princípios, ainda não está inteiramente consolidada nesse domínio.

A razão disso reside na relação de dependência que a Física mantém com a Matemática, mais precisamente na necessidade de traduzir as intuições dos físicos em linguagem matemática. Dai a necessidade da interação interdisciplinar, sem a qual a teoria quântica não poderia evoluir; isto, por sua vez, remete à necessidade de uma terceira disciplina, que deve agir como uma espécie de interface entre a física quântica, a matemática e a lógica, a saber, uma epistemologia quântica.

Acreditamos que assim poderíamos conseguir traduzir as questões da física em argumentos; e através disso colocar o assunto numa linguagem comum que é justamente o da epistemologia para a física quântica. Somente assim é possível dar o suporte interdisciplinar, necessário, para que a física possa tratar as questões de alta complexidade, as quais estão muito além das intuições naturais.

CONCLUSÃO

A mecânica quântica, ao longo de sua história, sempre suscitou muitas pesquisas, especulações e controvérsias. É uma ciência intrigante, na medida em que a exuberância dos vários fenômenos possui uma base minimalista: o

23 SILVA, E. E. Fundamentos da Mecânica Quântica em Teoria das Categorias. Tese (Doutorado) em Filosofia do Programa de Pós Graduação da UFPB, Orientador Giovanni S. Q, 2015, a aparecer.

universo amplo e diferencial dos fenômenos descritos deixa-se apreender a partir de uma formulação em poucos princípios e proposições.

A principal dificuldade que encontramos na MQ consiste em conciliar, em termos de interpretação, a teoria com a prática, e ideias antagônicas, como os conceitos de onda e partícula. Não há, no mundo clássico, analogias que permitam fundir o comportamento ora ondulatório, ora corpuscular da luz. Como resultado, a MQ é interpretada de diferentes maneiras e, para cada corrente ou escola de pensamento, o resultado de um experimento apresenta diferentes epistemologias.

Se, a princípio, podemos dizer que o arcabouço teórico da física quântica é distinto da física clássica, então é impossível não admitir que a mecânica quântica também a contém dentro de si. Além do mais, sempre foi uma fonte rica de argumentos heurísticos para a construção de teorias matemáticas e discussões filosóficas. Hoje, a mecânica quântica é o alicerce sobre o qual nos apoiamos para compreender o complexo universo físico.

O que fizemos ao longo deste trabalho foi mostrar que os conceitos básicos da teoria quântica envolvem um formalismo matemático e postulados que os representam. Esses postulados são utilizados para expressar um problema físico em termos matemáticos. Uma vez que a versão matemática do problema é formulada, ele pode ser resolvido por meio de técnicas puramente lógicas que não precisam ter qualquer interpretação física. Mas solução prática é, então, traduzida de volta para o mundo físico por meio de uma discussão epistemológica.

O formalismo da mecânica quântica é muito mais abstrato e menos intuitivo do que a mecânica clássica. O mundo quântico não é descrito apenas por vetores e operadores, por isso devemos dar uma atenção especial a linguagem da MQ, para tentar tornar a interpretação da teoria quântica mais clara e evidente possível.

REFERÊNCIAS

BIRKHOFF, G. and VON NEUMANN, J. The Logic of Quantum Mechanics. *in Annals of Mathematics*. v.37, n.4, 1936, p. 823–843.

COHEN-TANNOUJJI, C., DIU, D. and LALÖE, F. **Quantum Mechanics**. v.1. New York: Wiley, 1977, 847p.

DALLA CHIARA, M. L. and TORALDO DI FRANZIA, G. Individuals, Kinds and Names in Physics, in G. Corsi et. al (eds.) Bridging the gap: philosophy, mathematics, physics, **Boston Studies in the Philosophy of Science**, v.140, 1993, p. 261-283.

DALLA CHIARA, M. L. and TORALDO DI FRANZIA, G. Identity Questions from Quantum Theory, in K. Gavroglu et. al (ed.). **Physics, Philosophy and the Scientific Community**, Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1995, p. 39-46.

DALLA CHIARA, M. L., GIUNTINI, R. and GREECHIE, R. **Reasoning in Quantum Theory**. Dordrecht: Kluwer Academics Publishers, 2004.

EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. and ROSEN, N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical Review** **47**, 777, 1935.

FRAASSEN, B. C. V. **Quantum Mechanics: an empiricist view**. Oxford: Clarendon Press, 1991.

FRENCH, S. and KRAUSE, D. **Identity in Physics: A Historical Philosophical and Formal Analysis**. New York: Oxford University Press, 2006, 422p.

HEISENBERG, Werner. **Física e Filosofia**. Trad. Jorge Leal Ferreira. 2ed. Brasília: Ed. da UnB, 1987, 158p.

HILBERT, David. Mathematical Problems. **Bull. Amer. Math. Soc.**, v.33, n.4 (1927), 437-479.

HOWARD, D. Who Invented the Copenhagen Interpretation? A Study in Mythology. **Philosophy of Science**, 71, (December 2004), p. 669–682.

JAMMER, Max. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics: The Copenhagen interpretation**, New York: MacGraw-Hill, 1966.

JAMMER, Max. **The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective**. New York: John Wiley and Sons, 1974.

JAUCH, J. **Foundations of Quantum Mechanics**. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1968.

POST, H. Individuality and physics. **The Listener** 70, 1963, p.534-537.

RIGOLIN, G. G. **Estados Quânticos Emaranhados**. Tese (Doutorado) — Unicamp - Instituto de Física, Campinas, 2005. Orientador: Carlos Ourivio Escobar.

REDHEAD, M. and TELLER, P. Particles, Particle Labels, and Quanta: The Toll of Unacknowledged Metaphysics. **Foundations of Physics**, 21, 1991, 43-62.

SAKURAI, J. and NAPOLITANO, J. **Modern quantum mechanics**. New York: Addison-Wesley, 1985, 570p.

SILVA, E. E. **Fundamentos da Mecânica Quântica em Teoria das Categorias**. Tese (Doutorado) em Filosofia) do Programa de Pós-Graduação em Filosofia da UFPB, Orientador Giovanni S. Queiroz, 2015, a aparecer.

SCHRÖDINGER, E. An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. **Physical Review**. v.28, n.6, dez 1926, p.1049-1070.

SCHRÖDINGER, E. Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, v.31 (4), October 1935.

TORALDO DI FRANCA, G. What is a Physical Object?, **Scientia** 113, 1978, 57-65.

VON NEUMANN, J. **Mathematical Foundations of Quantum Mechanics**. Trad. Robert T. Beyer. London: Princeton University Press, 1995.

ZEILINGER, A. **Dance of the photons: from Einstein to quantum teleportation**. New York: Farrar, Strauss and Giroux, 2010.