



Seção: Varia

Consequências filosóficas do experimento mental do gato de Schrödinger

Philosophical consequences of Schrödinger's cat thought experiment

Consecuencias filosóficas del experimento mental del gato de Schrödinger

Eduardo Simões¹

Walter Ribeiro dos Santos²

Kailane Estevam Reis³

Clemisson Machado Batista⁴

Resumo

Este trabalho tem como escopo analisar as consequências filosóficas do experimento mental do gato de Schrödinger, discutindo dentre outras questões a explicação física do experimento e o seu significado, as consequências e implicações na Mecânica Quântica, quais sejam, o *status* privilegiado do observador, a noção de superposição, a questão do auto estado e colapso de onda, enfim, as críticas de Erwin Schrödinger à interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica. Trataremos das consequências filosóficas experimento mental do gato de Schrödinger, procurando contribuir para a compreensão dos aspectos que diferenciam a Física Clássica da Mecânica Quântica, além de contribuir para discussão filosófica na discussão das posturas realistas e antirrealistas que se encontram em meio ao debate estabelecido entre os precursores da Mecânica Quântica. A técnica metodológica utilizada neste artigo foi a revisão da literatura. Espera-se que o presente artigo venha possibilitar uma ampliação do conhecimento da filosofia envolvida em todo este debate e que gere reflexões acerca da natureza última da realidade.

Palavras-chave: Filosofia. Experimento Mental. Gato de Schrödinger. Crítica. Consequências.

¹ Doutor em Filosofia pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Professor do curso de Filosofia da Universidade Federal do Tocantins (UFT). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-8574>. E-mail: eduardosimoes@uft.edu.br.

² Mestrando em Filosofia pela Universidade Federal do Tocantins (UFT). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4957-9001>. E-mail: amigowalter@yahoo.com.br.

³ Graduanda em Filosofia pela Universidade Federal do Tocantins (UFT). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2286-9255>. E-mail: kailane.estevam@mail.uft.edu.br.

⁴ Graduando em Filosofia pela Universidade Federal do Tocantins (UFT). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7423-6150>. E-mail: clemisson.machado@mail.uft.edu.br.



Abstract

This work aims to analyze the philosophical consequences of the Schrödinger's cat thought experiment, discussing, among other issues, the physical explanation of the experiment and its meaning, the consequences and implications in Quantum Mechanics, namely, the privileged status of the observer, the notion of superposition, the question of self-state and wave collapse, in short, Erwin Schrödinger's criticisms of the orthodox interpretation of Quantum Mechanics. We will deal with the philosophical consequences of Schrödinger's cat mental experiment, seeking to contribute to the understanding of the aspects that differentiate Classical Physics from Quantum Mechanics, in addition to contributing to philosophical discussion in the discussion of realistic and anti-realistic positions that are found in the midst of the debate established between precursors of Quantum Mechanics. The methodological technique used in this article was a literature review. It is hoped that this article will enable an expansion of knowledge of the philosophy involved in this entire debate and that it will generate reflections on the ultimate nature of reality.

Keywords: Philosophy. Thought Experiment. Schrödinger's Cat. Criticism. Consequences.

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar las consecuencias filosóficas del experimento mental del gato de Schrödinger, discutiendo, entre otras cuestiones, la explicación física del experimento y su significado, las consecuencias e implicaciones en la mecánica cuántica, es decir, el estatus privilegiado del observador, la noción de superposición, la cuestión del autoestado y el colapso de la onda, en definitiva, las críticas de Erwin Schrödinger a la interpretación ortodoxa de la Mecánica Cuántica. Abordaremos las consecuencias filosóficas del experimento mental del gato de Schrödinger, con el fin de contribuir a la comprensión de los aspectos que diferencian la física clásica de la mecánica cuántica, además de contribuir al debate filosófico sobre las posturas realistas y antirrealistas que se encuentran en medio del debate establecido entre los precursores de la mecánica cuántica. La técnica metodológica utilizada en este artículo fue la revisión de la literatura. Se espera que el presente artículo permita ampliar el conocimiento de la filosofía involucrada en todo este debate y genere reflexiones sobre la naturaleza última de la realidad.

Palabras Clave: Filosofía. Experimento mental. Gato de Schrödinger. Crítica. Consecuencias.

Introdução

Reconhecido por sua criatividade e notável força imaginativa, Schrödinger consolidou-se como um dos mais influentes físicos do século XX. Formado na escola vienense de física, da qual fizeram parte L. Boltzmann, E. Mach, F. Exner, F. Hasenöhl,

P. Frank, H. Thirring, participou de uma atmosfera intelectual na qual física e filosofia dialogavam constantemente promovendo uma produção intelectual que valorizava o pluralismo, a historicidade, a coletividade, a dinâmica dos conceitos e a convivência com os diferentes modos de vida e teorias. Sua inserção intelectual ultrapassou os campos da física e, como resultado da leitura das obras de Schopenhauer, tornou-se profundamente interessado na teoria da cor, percepção e religião oriental, principalmente a hindu Vedanta.

Uma marca forte na filosofia da física de Schrödinger é a sua defesa do determinismo causal, da continuidade e da visualização (*anschaulichkeit*) da evolução espaço-temporal dos sistemas quânticos. Mesmo que no início da década de 1920, influenciado pelo seu mentor Exner, tenha defendido uma postura indeterminista e acausal em física, após 1927, com a batalha travada com Heisenberg contra a falta de visualização na Mecânica Quântica, Schrödinger manteve-se na defesa do determinismo e da continuidade até o fim da sua carreira. Sua resistência voltava-se contra qualquer tipo de imagem contraintuitiva que pudesse “borrar”, segundo sua concepção, a compreensão da natureza e do comportamento dos sistemas físicos. Esse era justamente o caso da noção de descontinuidade, comumente associada à imagem corpuscular dos objetos quânticos.

A descontinuidade está associada à imagem corpuscular na mecânica quântica porque, nessa teoria, muitas grandezas físicas não são contínuas, mas quantizadas, ou seja, ocorrem em pacotes discretos (os *quanta*). A noção descontinuísta era amplamente admitida e propagada pela Escola de Copenhague, da qual falaremos adiante.

Schrödinger, contudo, não seguiu a tendência descontinuísta adotada pela maioria de seus contemporâneos e propôs uma imagem alternativa: a imagem ondulatória. Segundo ele,

(...) a única razão para o clamor iconoclástico é a seguinte: o conceito de corpúsculo tornou-se, é verdade, a posse inquestionável e inalienável do físico, que o utiliza continuamente como um construto mental (...), mas (...) isso leva a um considerável constrangimento porque ainda não conseguimos fundi-lo com o conceito de onda. (Schrödinger, 1948, p. 202 – tradução nossa).

A equação que rendeu o *Prêmio Nobel de Física* para Schrödinger, em 1933, entretanto, apresenta uma noção completamente diferente. Inspirada no trabalho de De Broglie, mas com um formalismo matemático mais familiar, menos abstrato e mais simples, a mecânica ondulatória de Schrödinger admitia explicar o mundo quântico de

uma forma mais próxima da física tradicional, proporcionando uma solução mais rápida e intuitiva dos problemas físicos. Einstein a recebeu com muito entusiasmo e a reconheceu imediatamente como uma forte aliada. Em carta a Michel Besso, em 1 de maio de 1926, Einstein escreveu: “Schrödinger publicou dois artigos maravilhosos sobre as regras quânticas” (Pais, 1982, p. 442 – tradução nossa). A mecânica matricial tinha, finalmente, uma forte concorrente!

Aqueles que em seu desejo pela continuidade odiavam renunciar à máxima clássica *natura a non facit saltus* aclamaram Schrödinger como o mensageiro de uma nova aurora. De fato, em poucos meses, a teoria de Schrödinger cativou o mundo da física, pois parecia prometer a “realização daquele desejo irreprimível e por longo tempo malgrado” nas palavras de K. K. Darrow (...). Planck declarou: “Estou lendo-a com a sensação de uma criança que monta um quebra-cabeças”, e Sommerfeld ficou exultante. Assim, naturalmente, estava Einstein que, em princípios de 1920, escrevera a Bohr, “Eu não acredito que alguém vai resolver os quanta abandonando o *continuum*”. (Holton, 1984, p. 58).

Foi justamente a noção de descontinuidade quântica a geradora dos grandes embates entre Schrödinger e os partidários de Copenhague. Tais embates redundaram, por exemplo, na apresentação do experimento mental do gato que tinha, dentre outros objetivos, a função de desconstruir noções como as de superposição de estados quânticos, colapso da função de ondas e do *status* do observador na definição do estado do objeto quântico. Todas estas noções estavam envolvidas com o problema original da descontinuidade.

A associação entre a noção de descontinuidade e o experimento mental do gato de Schrödinger está, por exemplo, no salto abrupto entre estados⁵, ou seja, na transição súbita de um sistema quântico de uma *superposição* (por exemplo, “vivo e morto”) para um estado definido (“vivo ou morto”) no momento da medição. Essa descontinuidade reflete o que, na Interpretação de Copenhague, é chamado de *colapso da função de onda*: um processo não contínuo e não determinista, que contrasta com a evolução suave e determinística prevista pela equação de Schrödinger. O paradoxo do gato evidencia justamente essa quebra de continuidade entre a descrição matemática do sistema (que permite superposições) e a experiência empírica (em que se observa apenas um estado

⁵ Estes saltos são conhecidos como “saltos quânticos”. Para que o elétron, que se movia irradiando energia, não se precipitasse sobre o núcleo do átomo idealizado por Bohr, ele o concebeu movendo-se em “órbitas estacionárias”. Um átomo não emite radiação quando do seu estado estacionário; isso só ocorre quando faz uma transição, dá um salto, de um estado para o outro. Dessa forma, os elétrons podem se mover entre órbitas subindo e descendo na escala. Esses movimentos são conhecidos como saltos quânticos.

definido, o autoestado). O *observador*, por outro lado, conserva de si mesmo um *status* privilegiado, pois, com o ato de observar (ou medir), é ele quem causa o colapso da função de onda, ou seja, a passagem abrupta da superposição para um autoestado. No experimento do gato de Schrödinger, conforme veremos, isso implica que o gato estaria vivo e morto ao mesmo tempo até que o observador abra a caixa e observasse o sistema – o que sugere que a realidade física do sistema depende da observação. Isso coloca o observador numa posição ativa e privilegiada, quase como um agente definidor do que é o real, o que gera sérias questões ontológicas e epistemológicas sobre a natureza da realidade e o papel da consciência nesse processo.

O objetivo do presente artigo é justamente o de abordar de forma panorâmica o experimento do gato, apresentar as críticas com as quais ele está envolvido e, por fim, trazer à tona as implicações filosóficas a ele inerentes. A estas implicações estão associados problemas ontológicos (um objeto quântico, um elétron, por exemplo, possui identidade?), epistemológicos (é possível conhecer estados como os de superposição ou sua compreensão depende de um esforço interpretativo, ou seja, epistemológico?) e linguísticos (com a linguagem de que dispomos, aquela da física clássica, é possível enunciar quaisquer coisas que digam respeito a entidades quânticas?).

Espera-se que o presente artigo funcione como um estímulo para novas investigações e discussões no campo da filosofia, oferecendo aos físicos e demais interessados a percepção de que, em muitos casos considerados estritamente científicos, há problemas filosóficos fundamentais que exigem análise e reflexão para além dos limites da confirmação experimental e que pertencem a domínios tratados, por excelência, pela filosofia.

1. Sobre o formalismo do experimento mental do gato de Schrödinger

A década de 1920 marca o início da Mecânica Quântica, os experimentos e debates entre os físicos propiciaram um ambiente de interpretações antagônicas sobre o comportamento de partículas quânticas. A Interpretação de Copenhague, proposta por Bohr e Heisenberg, defendia conceitos sólidos, que estavam associados tanto à teoria corpuscular quanto à Mecânica Ondulatória, dependendo de como o processo experimental fosse configurado. De modo não simultâneo, em contrapartida, Schrödinger

apresentou, em 1926, a equação da função de onda, essencial para formular o experimento mental do gato.

Em 1935, Schrödinger publicou o artigo *Present Situation in Quantum Mechanics* em resposta à ortodoxia de Copenhague, com a apresentação do experimento mental do gato.

Pode-se até criar casos bastante ridículos. Um gato é trancado em uma câmara de aço, juntamente com o seguinte dispositivo diabólico (que deve ser protegido contra interferências diretas do gato): em um contador Geiger há uma pequena quantidade de substância radioativa, *tão* pequena que *talvez*, no decorrer de uma hora, um dos átomos decaia, mas também, com a mesma probabilidade, talvez nenhum; se isso acontecer, o tubo do contador descarrega e, através de um relé, libera um martelo que quebra um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se se deixar todo esse sistema por uma hora, pode-se dizer que o gato ainda vive se, nesse meio tempo, nenhum átomo tiver decaído. O primeiro decaimento atômico teria envenenado o gato. A função ψ de todo o sistema expressaria isso ao ter o gato vivo e o gato morto (perdoem a expressão) misturados ou espalhados em partes iguais.

É típico desses casos que uma indeterminação originalmente restrita ao domínio atômico se transforme em uma indeterminação macroscópica que pode ser *resolvida* por observação direta. Isso nos impede de aceitar de forma tão ingênua como válida um “modelo borrado” para representar a realidade. Em si, ele não incorporaria nada impreciso ou contraditório. Há uma diferença entre uma fotografia tremida ou fora de foco e uma fotografia de nuvens e bancos de neblina. (Schrödinger, 1980, p. 328 – tradução nossa).

A pretensão desse experimento era colocar em xeque a noção de nuvem de probabilidade⁶, questionando a natureza contraintuitiva do colapso de função de onda, bem como a da influência do observador. A possibilidade da morte e vida simultâneas do gato (ou as superposições quânticas de estados de emissão e não emissão), juntamente com a questão da transição do mundo microscópico para o macroscópico, é o centro da discussão do experimento.

Schrödinger crítica a Interpretação de Copenhague, principalmente no que diz respeito à noção de estado de superposição. Ele era ciente de que, em Mecânica Quântica Ondulatória, o princípio da superposição vem da adição de amplitudes de ondas por interferência, mas questionava a interpretação de que essa superposição representasse uma realidade física concreta. No experimento, a superposição de estados do gato (gato vivo e gato morto), enquanto a caixa está fechada, é parte substancial de sua crítica, pois delega à medição, ou ao observador consciente, a responsabilidade pelo colapso do estado

⁶ A “nuvem de probabilidade” refere-se à área ao redor do núcleo onde é mais provável encontrar um elétron.

– antes da caixa ser aberta, os estados do gato e do átomo estariam emaranhados. O observador teria, neste caso, um *status* privilegiado, pois seria ele quem determinaria, com a observação, a natureza do gato. “Essa solução porém soa absurda, já que nossa noção intuitiva de um objeto clássico é que ele não existe em tais superposições e que seu estado macroscópico não é afetado pelo ato de observação” (Pessoa Jr., 2019, p. 62).

Schrödinger, porém, entendia que independente da observação, o gato estava lá – “É típico desses casos que uma indeterminação originalmente restrita ao domínio atômico se transforme em uma indeterminação macroscópica que pode ser resolvida por observação direta” (Schrödinger, 1980, p. 328 – tradução nossa). Ao invés de acompanhar a situação paradoxal criada pela Interpretação de Copenhague, empenhou-se em defender o fenômeno ondulatório, contínuo (sem colapsos ou “saltos”), desenvolvendo um modelo matemático para isso. O sistema questionado pelo físico é descrito por uma função de onda onde ocorre a superposição de dois estados: o estado “gato vivo” e o estado “gato morto” – até caixa ser aberta e a função de onda colapsar em um dos dois estados.

Na Mecânica Quântica, um sistema pode existir em uma superposição de múltiplos estados. A superposição inicial do estado do átomo pode ser representada como:

$$|\psi_{\text{átomo}}\rangle = a |n - \text{dec}\rangle + b |\text{dec}\rangle$$

Onde $|n - \text{dec}\rangle$ é o estado “não decaiu” e $|\text{dec}\rangle$ o estado “decaiu”. Já a e b são coeficientes complexos que determinam a probabilidade de cada estado e satisfazem a presente normalização⁷:

$$|a|^2 + |b|^2 = 1$$

Quando se monta o experimento, a situação do gato depende do estado do átomo. Se o átomo está na situação “não decaído”, o gato está vivo. Se, no entanto, o átomo “decaiu”, o gato está morto. Então, a função de onda do sistema que inclui o átomo e o gato é dada por:

⁷ A soma das probabilidades de todos os estados possíveis deve ser igual a 1 (isso se chama normalização da função de onda).

$$|\psi\rangle = (a |n - dec\rangle \otimes |vivo\rangle + b |dec\rangle \otimes |morto\rangle)$$

No caso mais simples do experimento, assume-se que os coeficientes são iguais e que as probabilidades de cada estado são iguais (1/2 para cada, isto é, cada estado tem a mesma chance de ocorrer quando o sistema for medido). Temos, então, que $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, isso porque, se as probabilidades de medir o sistema em cada um dos dois estados são iguais a 1/2, os coeficientes $|a|^2 + |b|^2 = 1$ precisam ser $\frac{1}{\sqrt{2}}$ para garantir que a soma das probabilidades seja 1, ou seja, que a função de onda esteja normalizada⁸. Chegando à função normalizada do sistema combinado temos:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|n - dec\rangle \otimes |vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |dec\rangle \otimes |morto\rangle)$$

Por fim, a equação que descreve o estado quântico do sistema inteiro (gato + átomo) é:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|n - dec\rangle \otimes |vivo\rangle + |dec\rangle \otimes |morto\rangle)$$

Na equação, $|\psi\rangle$ representa a função de onda do sistema inteiro, na qual:

- a) $|n - dec\rangle \otimes |vivo\rangle$ representa o estado em que o átomo não decaiu e o gato está vivo;
- b) $|dec\rangle \otimes |morto\rangle$ representa o estado em que o átomo decaiu e o gato está morto.

As noções de superposição de estados e colapso de função de ondas foram alguns dos incômodos de Schrödinger expressos no experimento do gato e sobre os quais trataremos adiante. Resta-nos salientar que para quem não é habituado com esse tipo de formalismo ele expressa que o estado do sistema total é uma superposição com igual probabilidade (50%) de o átomo “não decair” e o “gato estar vivo”, ou de o átomo “decair” e o “gato estar morto” – dependendo do estado do átomo radioativo – até que

⁸ Isto é, se $|a|^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow a = \frac{1}{\sqrt{2}}$ e se $|b|^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, então, $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

uma medição seja feita. A Mecânica Quântica prevê que, antes da medição, o sistema está em uma combinação dessas possibilidades, o que cria a famosa situação paradoxal do gato de Schrödinger.

2. Consequências e observações na Mecânica Quântica: o papel do observador na experiência do gato

A exemplificação por meio do experimento mental do “gato” que não está vivo nem morto, mas morto-vivo, colocou em xeque várias concepções sobre a Mecânica Quântica oriundas da Interpretação de Copenhague. Além de fazer pensar em princípios, sobretudo, do ponto de vista realista, tal experimento expõe a crítica de Schrödinger ao antirrealismo⁹ de Copenhague e, nesse contexto, o papel do observador tem importância fundamental.

Ao tratar do formalismo da Mecânica Quântica, Krause (2019) assevera que “o que se vê é um tratamento matemático que tem como conceitos primitivos as noções de estado e observável”. Complementa, ainda, que “[...] os sistemas físicos propriamente ditos, como partículas elementares, átomos e moléculas, aparecem apenas implicitamente, a sua natureza sendo relegada às interpretações” (Krause, 2019, p. 105). Sob esse prisma, o formalismo matemático não é capaz de dar ao observador a experiência material dos achados, não possibilita a este a visualização, resultando, ao fim, em um esforço interpretativo, ou seja, epistemológico.

Esse raciocínio parece ter sido uma das intenções das críticas direcionadas por Schrödinger no experimento mental do gato. Nesse caso, ele critica o fato de se atribuir ao observador não apenas o papel de contemplar a realidade apresentada, mas também de interferir e decidir, pois, ao realizar a medição (ao abrir a caixa), este tem o poder de definir a realidade do objeto. Esse é um dos principais pontos de discordância de Schrödinger com a Interpretação de Copenhague, pois critica essa “criação da realidade” a partir da consciência (da decisão) do observador, uma vez que, como realista¹⁰, não

⁹ O presente artigo não tem por objetivo abordar, nem historicamente, nem de maneira exaustiva, os vários sentidos e variantes de “realismo” e “antirrealismo” na Filosofia da Física ou na Filosofia da Ciência. O que se expõe aqui a respeito destes termos diz respeito ao “realismo de ondas” de Schrödinger e ao “antirrealismo positivista” ou “instrumentalista” da Interpretação de Copenhague. Para maior aprofundamento acerca da análise e dos sentidos históricos destes termos, sugerimos lerem:

PESSOA JR., O. Mapa das Interpretações da Teoria Quântica. In: MARTINS, R.A.; BOIDO, G.; RODRÍGUEZ, V. (orgs.), *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*. Campinas: AFHIC, 2006. p. 119-152.

¹⁰ É importante acrescentar uma observação sobre a qualificação de Schrödinger como um físico realista. Alguém poderia argumentar que essa classificação não é adequada, pois, por exemplo, em 1922, ele proferiu

acredita que para algo existir (ou se manifestar) esse algo dependa da ação de um observador. Se a matemática aponta para a ocorrência dessa realidade, eis que isso é uma questão de interpretação, conforme afirmou Krause (2019), e não manifestação empírica da natureza da realidade.

[...] a mecânica quântica não nos permite falar de gatos ou de partículas; ela é meramente uma teoria matemática que nos permite computar probabilidades, como a de que o estado do sistema sendo uma superposição “gato + material radioativo”, após a medição, resulte algo como

$$|\text{gato vivo}\rangle \otimes |\text{não houve decaimento}\rangle ,$$

o que atestaria que não houve decaimento e o gato continua vivo. Só isso, nada mais. (Krause, 2019, p. 108).

No que concerne à asserção de que, com a medição, “o sistema entra imediatamente em um dos estados componentes” (Krause, 2019, p. 106), significa que o ato de medir faz com que o observável seja interpretado como o estado detectado de forma definitiva. Isso seria simples se não fosse possível que, no momento da medição, o sistema pudesse assumir um estado diferente. A chance de o sistema assumir um determinado estado depende da intensidade de sua presença naquele estado, que está relacionada à amplitude do autovetor na combinação linear. Como no exemplo do gato, ele pode estar vivo ou morto, mas, antes da medição ou do colapso da função de onda, ele existe em uma superposição, na qual a função de onda define as probabilidades de cada um desses estados.

No que diz respeito ao problema da identidade, o que se pergunta é: é possível de fato atribuir identidade a uma partícula? Aqui se tem um problema ontológico que mereceu de Schrödinger uma interessante reflexão. Certas dificuldades, em razão da perda de informação durante o colapso, no momento da apresentação e do registro do objeto quântico ao observador, não permitem uma resposta afirmativa à questão colocada.

na Universidade de Zurique uma palestra intitulada *O que é uma lei natural*, publicada em 1929 e incluída no livro *Science and The Human Temperament*, na qual criticava a causalidade, o determinismo e, por consequência, o realismo. No entanto, é relevante considerar que esse momento específico de sua trajetória intelectual reflete um período em que, influenciado por seu ex-professor Franz Exner, Schrödinger adotava posições epistemológicas típicas dos físicos vienenses da época, como a convivência com o pluralismo, a valorização de uma epistemologia histórica, o diálogo com a metafísica, a crítica à causalidade, a formulação de uma física acausal e a valorização do indeterminismo na física. A partir de 1927, após uma intensiva disputa, especialmente com Heisenberg, sobre a necessidade de visualização (*Anschaulichkeit*) na física, Schrödinger, que inicialmente criticava o determinismo absoluto, passou a atacar o indeterminismo absoluto. Esse novo posicionamento se tornou alvo de suas críticas até seus últimos textos publicados, como é o caso de *Are There Quantum Jumps?* de 1952.

Na escala das partículas elementares não se pode atribuir ao objeto quântico identidade. Tais objetos não são indivíduos, não têm identidade e nem individualidade e, muito menos, semelhança. A lógica subliminar a esta noção de Schrödinger não é a lógica da identidade dos indiscerníveis de Leibniz, mas uma lógica que não vislumbra qualquer identidade desses objetos. Eles são forma pura.

[...] quando se trata das partículas elementares constituintes da matéria, parece que não fazem sentido pensar nelas novamente como consistindo em algo de material. Elas são, por assim dizer, forma pura, nada mais senão forma. O que surge uma e outra vez em observações sucessivas é esta forma não uma quantidade ínfima e individual do material. (Schrödinger, 1996, p. 110).

Quando se diz que as entidades quânticas são “formas” e não têm identidade, isso está relacionado ao fato de que elas são descritas por funções de onda, que são representações de probabilidades, não objetos fixos e localizados. A função de onda descreve uma “forma” que se espalha no espaço e no tempo, mas não é algo com uma identidade individual, como um objeto clássico. O estado quântico é mais uma representação de possibilidades do que uma definição clara de “quem” ou “o que” é a partícula.

E se para Schrödinger, não há identidade para partículas, então, para se construir uma semântica para uma lógica desse tipo, isto é, sem levar em consideração a identidade, tem que se construir uma teoria de matemática diferente. Que não seria, por exemplo, uma teoria de conjuntos. Sabe-se que na teoria de conjuntos existe um critério de identidade para conjuntos, a despeito deles também não serem objetos em um sentido usual. Nessa teoria, um conjunto é definido pela propriedade de seus elementos, e a identidade de um conjunto é determinada exclusivamente por esses elementos, independentemente da ordem ou da forma como eles são listados. Se analisarmos por esse lado, veremos que o critério de identidade de um conjunto é, portanto, objetivamente determinado: dois conjuntos são idênticos se e somente se tiverem exatamente os mesmos elementos (axioma da extensionalidade). Não importa como ou onde os elementos estão “organizados” ou “localizados”, se eles são os mesmos, os conjuntos são considerados os mesmos. Trata-se de um exemplo de identidade abstrata: um conjunto, apesar de não ser um “objeto físico” no sentido tradicional, tem uma identidade bem definida pela sua composição. Dessa forma, para se construir uma semântica para uma lógica onde um indivíduo não é portador de identidade teria que se pensar na formulação de uma teoria de quase-conjuntos, onde a metafísica de entidades não obedece a identidade dos

indivíduos ou na qual se assume uma ontologia de coisas que não têm identidade, ou não-indivíduos. Esse projeto foi levado a cabo por Krause (1991, 1992, 1999, 2003, 2007, 2008, 2009, 2010a, 2010b, 2022, 2023) sobre cujos detalhes não trataremos aqui.

Contudo, se compararmos a noção de identidade na teoria dos conjuntos com a noção correspondente na Mecânica Quântica, perceberemos um contraste significativo. Enquanto na teoria dos conjuntos um conjunto possui identidade bem definida, na Mecânica Quântica partículas e estados quânticos não têm uma identidade fixa e independente, já que as partículas quânticas são indistinguíveis. Não há como distinguir uma partícula quântica, como elétrons ou fótons, da outra. Elas são “indistinguíveis” de uma forma fundamental, isto é, não existe uma etiqueta que nos permita identificar uma partícula específica em um sistema. Essa ausência de diferenciação implica que as partículas quânticas não têm uma identidade fixa no sentido usual (como um número de identificação único). O que precisa ser entendido neste contexto, então, é: e o que é “identidade”?

A identidade na filosofia clássica é geralmente entendida como persistência de um ser ao longo do tempo. Em outras palavras, a identidade é a característica que torna uma coisa a mesma ao longo do tempo, apesar das mudanças que possa sofrer. Este conceito pode ser expresso no Princípio da Identidade, que afirma que “A é A”, ou seja, qualquer coisa é idêntica a si mesma.

[...] David Hume colocou dúvidas sobre essa concepção intuitiva: a tendência que temos de pensar que um objeto possa permanecer o mesmo, para o qual atribuímos uma identidade, dever-se-ia a uma conexão que fazemos entre causa e efeito (constância em nossas percepções), mas não temos qualquer garantia de que ele não sofreu mudanças, mesmo que haja semelhanças que se mantenham (Hume 1985, p.74, e *passim*). (Krause, 2019, p. 117).

Segundo Hume, nem mesmo o isolamento total de um indivíduo asseguraria a ideia de identidade. Nessa situação, tudo o que poderíamos atribuir-lhe seria apenas a noção de unidade.

A Mecânica Quântica também desafia essas concepções tradicionais de identidade. Nela, a identidade de uma partícula ou sistema pode ser vista como relacional ou condicional ao contexto de uma medição ou interação. Antes de qualquer medição, como se disse, as partículas estão em uma superposição de estados, e sua identidade “real” não se define até que se observe ou se interaja com elas. Neste sentido, a identidade, no contexto da Mecânica Quântica, parece ser mais fluida, mais relacionada ao potencial e à

observação do que uma característica fixa e atemporal. Esse entendimento desafia as visões filosóficas tradicionais de uma identidade constante e imutável.

Contudo, para Schrödinger, essa concepção apresenta sérios problemas, especialmente no que diz respeito ao papel do observador na Mecânica Quântica. Se a identidade de um objeto quântico é definida apenas no contexto da medição ou da interação, então o observador – conforme sustentam os partidários da Interpretação de Copenhague – ocuparia um papel privilegiado na determinação da ontologia do objeto. Foi justamente por isso que Schrödinger se distanciou da interpretação ortodoxa da teoria quântica, por considerá-la incompleta e inconsistente com seus posicionamentos sobre o determinismo e a realidade física.

Tão abundante quanto as interpretações ontológicas divergentes entre realistas e antirrealistas¹¹, que não é objeto deste artigo, são as probabilidades dentro de um sistema como o ondulatório de Schrödinger. Conceber entidades a partir de cálculos e/ou por meio da observação vai depender do que cada cientista entenda como possível de ser identificado como um objeto. E qual é o papel do observador no experimento mental do gato de Schrödinger?

Nos séculos XVIII e XIX existia uma tendência em descrever a realidade de maneira objetiva:

O ápice deste movimento “naturalista”, “realista”, “objetivista” seria conseguir descrever todas as propriedades do aparelho cognitivo humano (incluindo a consciência, o livre arbítrio, etc.) através das ciências naturais. Era uma forma de materialismo ou mecanicismo que ainda hoje inspira a pesquisa em ciências naturais, e cuja relação com as teses transcendentais é ainda fonte de muita discussão nos meios filosóficos. (Pessoa Jr., 2001, p. 2).

A partir de 1920, assume-se novo posicionamento na Mecânica Quântica e todas as maneiras de defender uma interpretação realista foram consideradas um fracasso. Mas, e o que isso tem a ver com o papel do observador? Se a busca pela identificação da entidade do objeto é realizada antes do colapso de um dos valores da superposição, o que ocorreria antes da abertura da caixa, o que teremos é apenas um cálculo matemático probabilístico. A crítica, portanto, é sobre: se a caixa está fechada, o que acontece ali só

¹¹ “Antirrealistas têm se posicionado de diferentes formas quanto à questão *ontológica* acerca da existência e independência de entidades inobserváveis, indicando que a questão do debate pode ser tratada sem que a noção de verdade figure na cena principal [...]. Outros *antirrealistas* discutem a questão *epistemológica* sobre nossa capacidade de conhecer objetos inacessíveis à observação, embora não neguem a existência de entidades inobserváveis, como Bas van Fraassen” (Duarte, 2016, p. 56-57, grifos nossos).

pode ser explicado, não pela visualização, mas pelo esforço racional e dedução. Em outras palavras, o evento quântico não pode ser registrado em sua totalidade, senão pelo resultado da medição. Se se está diante de uma proposta antirrealista de compreensão do fenômeno, afirma-se que a realidade do objeto se dá a partir de sua medição, isto é, quanto o observador traz à “existência” o objeto ora observado.

Segundo o posicionamento de Popper (1989, p. 54), o papel desempenhado pelo observador, por ele chamado de experimentalista, é “o mesmo papel que na física clássica. Sua tarefa é testar a teoria”. Mas, ainda segundo o filósofo austríaco, a Interpretação de Copenhague é oposta a esta lógica, pois, ao dar um *status* privilegiado ao sujeito, fez com que a realidade objetiva se evaporasse. Nessa concepção, “a mecânica quântica não representa partícula, mas sim o nosso conhecimento, as nossas observações ou nossa consciência das partículas” (Popper, 1989, p. 54).

A mesma crítica está por trás do experimento mental do gato de Schrödinger. A interpretação do experimento nos encaminha para o entendimento de que, embora o observador desempenhe a função de preparar o sistema e tenha “poder” sobre os resultados, este é limitado ao âmbito das probabilidades. Além de que, numa observação do resultado macroscópico, não seria possível atestar a “olho nu” o gato em uma superposição, pois que no mundo clássico os objetos obedecem às leis newtonianas. Independente da atuação do observador, o gato está lá. A observação não o cria, nem o mata ou o permite viver. O observador tão somente constata durante a medição (ao abrir da caixa) uma das condições macroscópicas, vivo ou morto, sem que isso signifique aleatoriedade. Assim, pode-se afirmar que, para a Física Quântica, a atuação do observador é elemento indispensável diante de situações que não se pode visualizar. Contudo, para o realista, interpretar a realidade não significa criá-la, ou seja, as coisas existem independente de uma consciência as perceba. A consciência pode realizar a leitura e elaborar uma explicação (criar uma interpretação), no entanto, não extravasará o papel descritivo do fenômeno.

Assim, pelo o que se depreende do contexto do experimento, não se afasta a possibilidade da concepção realista de mundo. O resultado alcançado em nível macroscópico demonstra que ao observador não é dado condições certificar estados de superposições. E é nesse sentido que a crítica tem suas razões. Para a explicação do estado de superposição e uma respectiva redução de estado – quando isso é cotejado com a realidade macroscópica – é necessário o uso da interpretação, da imaginação, da razão.

Isso tudo, configura uma espécie de antirrealismo combatido por Schrödinger. O papel do observador não é o de criar a realidade, mas medi-la, detectá-la e descrevê-la. Ela existe independente da mente ou da consciência do observador, segundo o realismo professado por Schrödinger.

3. Superposição, autoestado e colapso de onda: as críticas de Schrödinger à interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica

Em 1926, Erwin Schrödinger propôs a Interpretação Ondulatória da Mecânica Quântica, baseada em uma equação que descreve a evolução temporal da função de onda de um sistema quântico. Na Interpretação Ondulatória, a função de onda (Ψ) de um sistema quântico não representa a partícula em si, mas sim a amplitude de probabilidade de encontrar a partícula em um determinado estado. Essa amplitude é quantificada por $|\Psi|^2$, que é o módulo quadrado da função de onda. Em outras palavras, a função de onda fornece informações sobre a probabilidade de encontrar a partícula em uma região específica do espaço ou com um valor específico de momento, energia ou outra propriedade física.

Schrödinger utilizou a analogia com ondas para ilustrar o comportamento da função de onda. As ondas, como ondas na água ou ondas sonoras, podem ser descritas por uma função matemática que oscila em amplitude e frequência. Na Interpretação Ondulatória, a função de onda de um sistema quântico se comporta de forma similar a uma onda, com regiões de alta amplitude representando maior probabilidade de encontrar a partícula e regiões de baixa amplitude representando menor probabilidade.

Como se afirmou, Schrödinger se opôs à Interpretação de Copenhague, defendida por Niels Bohr e Werner Heisenberg¹². Os partidários de Copenhague afirmam que a função de onda não representa a realidade física em si, mas apenas uma probabilidade de encontrar uma partícula em um determinado estado. O colapso da função de onda, que

¹² Sobre a perspectiva da existência de um ponto de vista unitário em torno dos físicos que frequentavam o “ciclo de Copenhague”, formado em torno da figura de N. Bohr, existem diversas divergências. Don Howard, por exemplo, em *Who Invented the “Copenhagen Interpretation”? A Study in Mythology*, defende um ponto de vista com o qual estamos alinhados. Segundo ele: “A ideia que havia um ponto de vista unitário sobre a interpretação de Copenhague era, deve-se argumentar, uma invenção do pós-guerra, para a qual Heisenberg foi principalmente responsável. Muitos outros físicos e filósofos, cada um com sua agenda, contribuíram para a promoção desta invenção com fins polêmicos ou retóricos. A lista inclui David Bohm, Paul Feyerabend, Norwood Russell Hanson e, mais importante, Karl Popper. Compreender as motivações desses atores nos levará um longo caminho em direção ao compreender como visões tão estranhas a Bohr poderiam ter sido impostas a ele” (Howard, 2004, p. 669-670).

ocorre no momento da medição, é considerado um processo de aferição baseado na indeterminação, ou seja, já que não se pode inferir uma cadeia de acontecimentos causais necessita-se, portanto, da intervenção do observador. Schrödinger discordava dessa visão por considerá-la incompleta e inconsistente com suas crenças sobre a realidade física. Ele argumentava que a função de onda representa a realidade física e que a noção de colapso é uma indicação de que a Mecânica Quântica era incompleta e que faltava uma descrição mais fundamental da realidade. Dessa forma, ele aceitou a estrutura matemática da Mecânica Quântica, incluindo a noção de autoestados, porque esta é uma parte essencial de sua teoria de ondas. Contudo, via os autoestados como componentes matemáticos que ajudavam a calcular as probabilidades de diferentes resultados experimentais, em vez de entidades físicas reais. Um estado quântico representa a condição completa de um sistema, incluindo todas as suas propriedades físicas. Autoestados são estados específicos com propriedades bem definidas, como energia ou momento. A Mecânica Quântica permite que um sistema esteja em uma superposição de estados, ou seja, em uma combinação de diferentes estados ao mesmo tempo. Agora, como conciliar essa superposição com a ideia de um estado como uma condição completa e bem definida?

Schrödinger tinha sérias reservas sobre a interpretação de que uma superposição de estados corresponde a uma realidade física literal. A sua equação, por exemplo, permite que a função de onda de um sistema quântico seja uma superposição linear de autoestados. Esta superposição – que é uma descrição matemática correta de estados quânticos, mas não representante de uma realidade física concreta – é uma combinação de estados possíveis, cada um com uma certa amplitude que determina a probabilidade de encontrar o sistema em um desses estados em uma medição. No momento da medição, a função de onda, segundo a perspectiva de Copenhague, “colapsa” para um único estado, com um valor definido do observável. Como explicar esse colapso abrupto e a aparente perda de informação sobre os outros estados da superposição? Com relação a essa indagação, conforme supramencionado, Schrödinger via na concepção de colapso da função de onda uma indicação de que a Mecânica Quântica era incompleta e que faltava uma descrição mais fundamental da realidade. E, em virtude de seu posicionamento, passou a ser criticado por alguns adeptos da ortodoxia de Copenhague.

Segundo Beller (1997, p. 421 – tradução nossa), “[...] a ortodoxia de Copenhague banalizou as objeções de Schrödinger e subestimou suas proeminentes percepções. Os físicos de Göttingen-Copenhague apresentaram Schrödinger como um reacionário,

irremediavelmente preso nos modos de pensamento deterministas e ingenuamente realistas da física clássica”, ou então, “conservador, realista clássico simplório, relutante e incapaz de ‘sacrificar conceitos tradicionais e aceitar novos’”. Mas, como conciliar o determinismo clássico (conceito tradicional) com a natureza probabilística da Mecânica Quântica (nova perspectiva)?

Na equação que descreve a evolução temporal da função de onda de um sistema quântico, vemos que tal evolução é determinística, ou seja, o estado futuro do sistema pode ser completamente determinado por seu estado inicial e pelas leis da Física. O colapso da função de onda parece introduzir um elemento aleatório, violando o determinismo da evolução temporal. Tal colapso é intrinsecamente probabilístico e não pode ser previsto deterministicamente. Mesmo que conheçamos a função de onda exata antes da medição, só podemos prever as probabilidades dos possíveis resultados, não o resultado específico de uma medição individual. Este aspecto probabilístico introduz uma aleatoriedade fundamental na Mecânica Quântica, que contrasta com a evolução determinística da função de onda entre as medições. E, como conciliar aleatoriedade e determinismo se tais conceitos são aparentemente contraditórios?

A problematização dos conceitos básicos da Mecânica Quântica revela a natureza complexa e ainda não totalmente compreendida da teoria. A busca por uma interpretação definitiva que explique todos os seus aspectos, sem contradições ou inconsistências, continua a ser um dos grandes desafios da física moderna. Krause (2019, p.105), afirma que “a física quântica é um dos campos do saber que mais nos apresentam resultados que nos parecem totalmente estranhos, e as explicações que tentamos dar, tomando por base o que (supostamente) conhecemos, a física clássica, via de regra não são satisfatórias”. Dessa forma, várias interpretações se apresentam para tratar da conciliação entre aleatoriedade e determinismo. Cada abordagem oferece uma forma de entender como esses conceitos podem coexistir.

Enquanto a Mecânica Quântica desafia nossa intuição clássica, todas as interpretações tentarão, de diferentes maneiras, apresentar um sentido ao comportamento quântico observado. Certo é que, no âmbito desta ciência, o determinismo clássico deixou de estar em evidência e as atenções se voltaram para o indeterminismo, o descontínuo, o não-local, o não-causal e o incerto. Schrödinger, tal como Einstein, colocou-se como um ponto de questionamento oferecendo uma abordagem que busca uma descrição mais completa e determinística dos sistemas quânticos, contrastando principalmente com a

Interpretação de Copenhague, que enfatiza a natureza probabilística (incerta) e subjetiva da realidade quântica, conforme defendia Heisenberg.

Essa influência (do observador) introduz um novo elemento de incerteza, pois o aparelho de medida é, necessariamente, descrito na linguagem da física clássica; uma tal descrição contém todas as incertezas que digam respeito à estrutura microscópica do instrumento de medida que conhecemos da termodinâmica e, visto que esse instrumento está ligado ao resto do mundo, aquela descrição conterá, de fato, as incertezas da estrutura microscópica do mundo todo. Essas incertezas podem ser rotuladas de *objetivas*, dentro dos limites em que elas possam ser consideradas como uma simples consequência da descrição em termos da física clássica e pelo fato de independermos do observador. Por outro lado, elas podem ser consideradas como *subjetivas*, na medida em que se referem ao nosso conhecimento incompleto do mundo. (Heisenberg, 1995, p. 45 – acréscimos de destaques nossos).

4. Consequências Filosóficas do Experimento Mental do Gato de Schrödinger

O experimento mental do gato de Schrödinger demanda ao pensamento filosófico reflexão sobre o que é o real e sobre a possibilidade de transferência de noções atinentes ao mundo quântico para o mundo clássico. Mais do que isso, levanta a questão sobre se tais noções quânticas são de fato representação do real ou uma imagem provável de como o universo se comporta na escala do micro.

Segundo Baker (2015, p. 64), Bohr teria dito que “tudo aquilo que chamamos de real é feito de coisas que não podem ser consideradas reais”. Nesse sentido, aquilo que se encontra como substratos últimos da realidade (quarks, léptons, fótons, glúons, bósons, etc.) não são, de fato, coisas reais. E, se não o são, de que se tratam? De entidades matemáticas explicativas do que era suposto ser o real? De uma imagem adequada, porém, não verdadeira do que é o real? De uma teoria que não funciona aos moldes da correspondência, isto é, a imagem não corresponde, de fato, ao real?

Certo é que, o que é convencionalizado como “realidade”, no nível macroscópico, é composto por entidades quânticas que não possuem realidade definida no sentido quântico. E é sobre isso que Bohr está tratando quando diz que “tudo aquilo que chamamos de real é feito de coisas que não podem ser consideradas reais”. A “realidade” que percebemos é uma manifestação emergente de processos subjacentes que são governados por princípios quânticos, os quais não podem ser considerados “reais”, de acordo com nossas intuições clássicas. Como se viu acima, na acepção de Schrödinger, tais entidades não são sequer “indivíduos”.

A *velha* ideia acerca delas era que a *sua* individualidade se baseava na identidade da matéria contida nelas. Isto parece ser uma adição sem fundamento e quase mística, que representa um contraste marcado com o que acabamos de descobrir que constitui a individualidade dos corpos macroscópicos, bastante independente dessa hipótese materialista grosseira e não necessitando do seu apoio. A noção *inovadora* é que aquilo que é permanente nestas partículas elementares ou pequenos conjuntos é a sua forma e organização. O hábito da linguagem do dia-a-dia engana-nos e parece invocar, sempre que ouvimos pronunciar a palavra “configuração” ou “forma”, a configuração ou forma de *algo*, parece significar que é necessário existir um substrato material para assumir a forma. (Schrödinger, 1996, p. 110).

Forma e organização são, portanto, aquilo que há de permanente nessas partículas elementares que não advém de nenhum substrato material e que, em virtude disso, também não podem ser tidas como formas geométricas, aliás, “*não existe qualquer observação relacionada com a forma geométrica de uma partícula ou mesmo de um átomo*” (Schrödinger, 1996, p. 111). Os modelos apresentados pelos cientistas, aos moldes do Modelo Padrão da Física de Partículas, são apenas “imagens mentais”, “ferramenta do raciocínio”, isto é, tratam-se de modelos que são *adequados*, porém, não são *verdadeiros*, “pois, para que uma descrição *possa* ser verdadeira, deverá poder ser comparada *diretamente* com os fatos verdadeiros. Este não é habitualmente o caso dos nossos modelos” (Schrödinger, 1996, p. 111).

Estender a realidade do comportamento micro para o âmbito macro (clássico), torna as coisas ainda mais difíceis. Como se viu, o experimento do gato procura ilustrar a noção de superposição, imaginando-a aplicada a objetos do dia a dia. No entanto, a ideia de que o gato (um objeto macroscópico) pode estar vivo e morto (em estado de superposição), ao mesmo tempo, até que se realize a medição é extremamente contraintuitiva. O experimento mental do gato de Schrödinger, dessa forma, coloca em xeque, de uma só vez, as três concepções: a da superposição, do colapso e do *status* privilegiado do observador.

Com relação à superposição, conforme se disse, Schrödinger aceitava ser ela uma descrição matemática correta dos estados quânticos, mas questionava a interpretação de que essa superposição pudesse representar uma realidade física concreta. Da mesma forma, ele era cético quanto à interpretação que envolvia o colapso da função de onda.

Quanto ao papel privilegiado do observador, Schrödinger afirma que Bohr é quem sustenta que a “observação exata envolveria uma interferência tão grande com ‘o objeto’ (ou corpo do homem – *ou do gato*) que o dissociaria em partículas únicas – de fato, matá-lo-ia de uma forma tão eficiente que nem sequer restaria um cadáver para sepultar”

(Schrödinger, 1996, p. 141 – acréscimos nossos). Ele reforça a sua posição ao afirmar que, “na verdade, penso que tenho de acusar Bohr – apesar de ser uma das pessoas mais simpáticas que já conheci – de uma crueldade desnecessária quando propõe matar a sua vítima através da observação” (Schrödinger, 1996, p. 141-142). E o que isso tudo representa senão atribuir, indevidamente, poderes extraordinários ao observador, permitindo-lhe decidir o que é a realidade? Em virtude disso, é que questiona Putnam (1965, p. 96 – tradução nossa):

Como nosso olhar afeta o estado do gato? O que há em nós e em nosso olhar que torna essa interação tão especial? Se a resposta for que somos apenas sistemas macrofísicos e que os macro-observáveis sempre mantêm valores nítidos, então é necessário objetar que é apenas essa suposição que é abandonada quando assumimos que pode ser possível preparar superposições de estados que atribuem valores diferentes a algum macro-observável.

O que Putnam (1965) quer dizer é que, se admitirmos que os macro-observáveis mantêm valores definidos o tempo todo, isso não é uma dedução dos fundamentos da Mecânica Quântica, mas sim uma suposição adicional introduzida. Isso significa que a ideia de que grandezas físicas macroscópicas (macro-observáveis) possuem sempre valores bem definidos não é uma consequência direta das leis fundamentais da Mecânica Quântica. Em vez disso, essa ideia precisa ser assumida como um princípio extra, ou uma hipótese adicional, para se alinhar com nossas observações cotidianas da realidade macroscópica. Na prática, este princípio é essencial para fazer a ponte entre a Mecânica Quântica e a Física Clássica. Sem ele, a Teoria Quântica, por si só, não explicaria por que objetos grandes, compostos de muitas partículas quânticas, exibem comportamentos tão previsíveis e definidos. Essa suposição é crucial para compatibilizar a Mecânica Quântica com a nossa experiência cotidiana e com a Física Clássica.

A noção de superposição clássica, que sugere que um sistema quântico permanece em superposição até ser observado, utilizada por Schrödinger para criticar a Interpretação de Copenhague, funciona bem como um instrumento do cálculo, da matemática de probabilidades. Agora, querer aplicá-la aos objetos cotidianos nos leva a resultados absurdos como aqueles da vida e morte simultâneas, do observador como criador da realidade e da descontinuidade da realidade.

Isso tudo é matematicamente claro, e o cálculo das probabilidades é algo que também se sabe fazer. A matemática funciona muito bem. O problema surge quando se tenta interpretar a superposição. Muitos dizem, erroneamente na opinião deste autor, que o sistema *está em todos os estados superpostos*

simultaneamente”. [...] Essa suposição é calcada em conceitos advindos da física clássica, e não temos (ainda) como exprimir em palavras o que o formalismo matemático está contando tão claramente. (Krause, 2019, p. 106).

Nessa direção, Krause (2019) irá questionar a suposta simultaneidade dos estados superpostos dizendo que a mesma não se trata de uma conjunção lógica, mas de uma soma vetorial, o que desconstruiria a concepção errônea de que as coisas acontecem “ao mesmo tempo”.

O erro frequente na interpretação desse resultado é não considerar que a soma $A + B$ é um terceiro vetor, que indica uma superposição dos estados A e B, e que é distinto de ambos (supostos não nulos). É errado portanto dizer que o gato está vivo (o que exigiria que o seu estado fosse A) ou que está morto (o que exigiria que seu estado fosse B), e muito menos “ao mesmo tempo”, o que exigiria que considerássemos a sua conjunção, e não a sua soma! O estado do gato é dado pelo vetor $A + B$, portanto nem por A e nem por B, mas pelo terceiro vetor, que não é uma conjunção lógica, mas uma soma vetorial. (Krause, 2019, p. 109).

Na perspectiva de tomar tal resultado como uma conjunção lógica, o que teríamos é que, ao afirmar a verdade de uma conjunção $A \wedge B$ (“o gato está vivo” e “o gato está morto”), estamos dizendo que as fórmulas A e B são verdadeiras, isto é, que é logicamente possível que tais estados de coisas estejam ocorrendo de forma simultânea, “ao mesmo tempo”. Contudo, conforme alertou Krause (2019), no caso do gato, não se pode confundir conjunção lógica com uma soma vetorial. A representação da soma vetorial, que é um terceiro vetor, aponta-nos para um caminho completamente diferente da noção de conjunção lógica (Krause, 2019, p. 108):

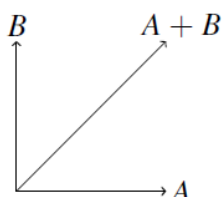


Figura 1: Superposição dos estados A e B.

Fonte: Krause (2019, p. 108).

O paradoxo do gato, no entanto, além das consequências concernentes à lógica, apresenta à Filosofia implicações que também refletem na ontologia, epistemologia e linguagem.

Quanto à ontologia subjacente à análise do paradoxo, a questão orientadora, segundo Krause (2019, p. 108), é: “Mas, antes da medição, qual a situação do gato?”. Se

questionamos a respeito da *situação do gato* é porque assumimos, de antemão, a sua existência, isto é, *existe alguma coisa antes da medição*. “A questão ontológica é especificar em que consiste esse algo, e a resposta não é única” (Krause, 2019, p. 108).

O propósito de Schrödinger com o experimento do gato, conforme foi dito, era o de mostrar as dissonâncias entre a Mecânica Quântica e a física newtoniana, no que diz respeito às superposições de estados de um sistema físico antes de ser medido. Os efeitos diretamente observáveis da superposição quântica, como aqueles dos padrões de interferências das ondas em experimentos com luz, não eram questionados por Schrödinger. Como precursor da Mecânica Quântica Ondulatória ele era ciente de que o princípio da superposição vem da adição de amplitudes de ondas por interferência, isto é, a amplitude de funções de ondas, ou vetores de estado, são somados. A questão ontológica problemática para Schrödinger, entretanto, era especificar que algo era esse que estaria em superposição. E, para isso, não havia dúvida alguma: “o conceito das ondas é inescapável no caso de se pretender tomar em linha de conta as franjas de interferência” (Schrödinger, 1996, p. 126). Já no caso das partículas, “pode igualmente argumentar-se que as partículas não são objetos identificáveis, podem ser consideradas como acontecimentos semelhantes a explosões ao alcance da frente da onda” (Schrödinger, 1996, p. 126). Enfim, no que diz respeito ao mundo quântico, em virtude de uma maior facilidade de visualização do sistema, Schrödinger defende que as ondas, não as partículas, representam melhor a noção a noção de superposição de estados (posição, energia, momento, etc.)¹³. A própria equação de Schrödinger pressupõe a existência de superposições quânticas, pois a função de onda (Ψ) de um sistema pode ser uma combinação linear de diferentes estados quânticos. O que é problemático, entretanto, é essa transição do quântico para o clássico ilustrada no experimento do gato, que foi concebido para levantar as implicações contraintuitivas da superposição quântica quando aplicada a objetos macroscópicos. A saída *instrumentalista* (Interpretação de Copenhague) para a resolução da situação do gato seria, então, nada falar sobre ele.

Para os instrumentalistas, a mecânica quântica não nos permite falar de gatos ou de partículas; ela é meramente uma teoria matemática que nos permite

¹³ “Não existe qualquer lacuna nesta imagem da mecânica ondulatória, tal como não existe qualquer lacuna no que diz respeito à *causa*. A imagem da onda está conforme com a exigência clássica do determinismo completo, o método matemático é o das equações de campo, apesar de por vezes serem uma espécie bastante generalizada de equações de campos” (Schrödinger, 1996, p. 124)

computar probabilidades, como a de que o estado do sistema sendo uma superposição “gato + material radioativo”, após a medição, resulte algo como

$$|\text{gato vivo}\rangle \otimes |\text{não houve decaimento}\rangle,$$

o que atestaria que não houve decaimento e o gato continua vivo. Só isso, nada mais. (Krause, 2019, p. 108)

É justamente no “falar sobre” que está a implicação linguística do gato de Schrödinger que é extensiva para a Mecânica Quântica. Segundo Bohr, neste campo, “[...] a exigência de comunicabilidade das circunstâncias e resultados das experiências implica que podemos falar de experiências bem definidas apenas no âmbito de conceitos comuns” (Bohr, 1937, p. 293 – tradução nossa). Em outras palavras, não temos uma outra linguagem para comunicar os resultados dos experimentos em física quântica a não ser por meio da linguagem ordinária, aquela da Física Clássica. Da mesma forma que usamos a linguagem comum para ilustrar o experimento do gato, também a empregamos para comunicar os resultados dos experimentos quânticos, mesmo sabendo que a nossa linguagem carece de termos adequados para descrever os processos atômicos.

Quando se comunica a respeito de tal realidade, de acordo com Schrödinger, “qualquer que seja a linguagem abreviada que nós, físicos, achemos conveniente usar entre nós, devemos estar cientes dos dilemas que justa e devidamente interessam aos outros; devemos ter o cuidado de não os ocultar ou distorcê-los por meio de um discurso frouxo” (Schrödinger, 1952, p. 233 – tradução nossa). Esta afirmação surge no contexto da crítica de Schrödinger às noções comumente aceitas em Mecânica Quântica, como a dos saltos quânticos. O uso da linguagem comum, mesmo que sob forma abreviada, não nos autoriza lançar mão da “licença poética” para enunciar ocorrências ocultas ou, então, distorcer a realidade por meio dos tais discursos frouxos.

O comportamento de Schrödinger em questionar os excessos da linguagem, bem como das imagens por ela projetadas, também pode ser estendido ao questionamento sobre o que, de fato, podemos conhecer. O experimento do gato suscita várias questões epistemológicas sobre a natureza, os limites e a confiabilidade do conhecimento que podemos obter sobre sistemas quânticos, destacando as complexidades e desafios de interpretar e entender tal mundo. As críticas que lhe foram feitas de que, por exemplo, o gato é um objeto macroscópico, um sistema vivo, e por isso não está no domínio de aplicação da Mecânica Quântica, são respondidas pelo próprio Schrödinger (1935), que afirma que o paradoxo do gato é meramente ilustrativo e não tem um papel essencial no

experimento (que é quântico). Dessa forma, tal imagem pode, portanto, ser substituída por um aparelho de medição. Contudo, ainda assim, o experimento do gato levanta-nos questões pertinentes ao conhecimento da realidade, conhecimento este, que se revela limitado para compreender a ordem intrínseca da natureza que se encontra velada pela incerteza.

Na acepção de Schrödinger, a admissão do indeterminismo levava a noções contraintuivas. Sua ferramenta fundamental – a equação que leva o seu nome – serviu para determinar a evolução futura do estado de um sistema de forma precisa, pois não aceitava o indeterminismo e a incerteza da Interpretação de Copenhague que eram calcados na ideia de que as partículas não têm propriedades definidas até serem medidas. Ele preferia uma visão mais determinística e buscava uma compreensão mais completa que não dependesse do colapso da função de onda e que não endossasse a indeterminação.

Se, como o princípio da indeterminação de Heisenberg (1983 [1927]) prevê, apenas *uma* das variáveis observáveis (tal como *posição* e *momento*) pode ser associada a uma descrição bem definida em um dado instante de tempo, então a *outra* variável não seria real? Ou, alternativamente, os aspectos não observados da realidade seriam reais, e a mecânica quântica tão somente se silenciaria acerca de tais aspectos? (Arroyo, 2023, p. 230).

Enfim, a pretensão de Schrödinger era a da busca de uma descrição completa, contínua, sem lacunas, ininterrupta, que se baseasse no espaço e no tempo, e que fosse fundada em fatos incontroversos. A interpretação proposta por ele é a de que “existe um objeto físico completamente determinado, mas nunca poderei saber tudo acerca dele” (Schrödinger, 1996, p.131). Dessa forma, foi que evidenciou os problemas epistemológicos advindos de noções como a da superposição dos estados quânticos, do papel do observador, do colapso da função de ondas e da própria coerência da Mecânica Quântica. Em virtude da falta de um conhecimento completo da realidade que emana do formalismo matemático é que nasce essa plêiade de interpretações, muitas das quais objeto de crítica de Schrödinger. Não estando nenhuma delas autorizadas a sustentar a exclusividade da verdade de suas afirmações, resta tratá-las como imagens adequadas. Contudo, a imagem mais adequada é aquela que tem a ver com a forma exterior da teoria e com a simplicidade dos conceitos e leis utilizados. Para Schrödinger, não parece ser nada adequada uma interpretação que quer dizer que “o objeto não tem qualquer existência independente do sujeito que o observa” (Schrödinger, 1996, p. 131). O experimento do gato pretende, justamente, questionar asserções como esta!

Considerações finais

Diante do que foi tratado no presente artigo, pode-se considerar que as consequências filosóficas do experimento mental do gato de Schrödinger tem relação com observações na Mecânica Quântica, notadamente naquilo que diz respeito ao papel do observador, à noção de superposição de estados quânticos e à de colapso de função de onda.

No que concerne ao papel do observador, realista que era, Schrödinger mantém posicionamento semelhante ao de Popper (1989), no qual esclarece que o papel do observador continua sendo o mesmo que na física clássica: “testar a teoria”. Nesse aspecto, o experimento do gato permite uma discussão acerca daquilo que se observa com aquilo que se interpreta.

Vale reforçar que Schrödinger, ao descrever o experimento mental do gato, coloca em xeque a Interpretação de Copenhague naquilo que diz respeito à concepção de que o observador é aquele que cria a realidade, ou seja, que os fenômenos dependem da existência do observador, escancarando assim, o enfoque antirrealista por parte dos adeptos daquela interpretação. Evidente que as repercussões de seu posicionamento foram combatidas, chegando a ser banalizado pela ortodoxia de Copenhague, sendo considerado “um reacionário”, [...] “um realista clássico simplório” e “relutante”, como se viu em Beller (1997, p. 425 – tradução nossa).

A inquietação de Schrödinger tem consequências filosóficas que ultrapassam seu momento histórico e que se tornam importantes fontes do repensar a noção de realidade. Quando se buscam explicações sobre superposição, autoestado e colapso da função de onda, em parte o pensador identifica uma situação: mesmo com a caixa fechada (sem possibilidade para visualização) são descritos fenômenos não observáveis, mas racionalmente delineados daquilo que ocorre dentro da caixa. Isso denota que a existência desses fenômenos depende da interpretação e não da visualização do observador, portanto, uma clara demonstração de um antirrealismo que é contrário ao racionalismo ontológico de Schrödinger.

Embora o físico tenha resistência sobre o posicionamento antirrealista (ou positivista, ou mesmo instrumentalista) predominante da Interpretação de Copenhague, sua contribuição para discussão tem relevância, principalmente naquilo que diz respeito às nossas concepções de realidade e na apresentação das dificuldades de noções anti-

intuitivas próprias da Mecânica Quântica. Nesse sentido, o experimento mental do gato constitui uma boa introdução para que pensemos questões como: é o observador quem cria a realidade? Os objetos existem somente no instante em que um observador os mede? A própria existência do fenômeno estaria vinculada ao processo de medição? A visualização do resultado macroscópico é uma imagem fidedigna do que acontece na escala quântica?

A reflexão provocada pelo experimento mental de Schrödinger, do ponto de vista filosófico, provoca-nos a pensar sobre a conexão entre o quântico e o clássico e a perguntar porque estas duas realidades, faces de uma mesma moeda, comportam-se de maneiras tão distintas. Dessa forma, tal experimento resume uma crítica filosófica à interpretação clássica da realidade na Mecânica Quântica.

Ao desafiar as verdades da Interpretação de Copenhague, Schrödinger revela a complexidade e estranheza de concepções como a da superposição quântica, pois entendia que independentemente da observação, o gato estava lá. Com seu modelo ondulatório em mãos, reflete sobre as absurdidades implementadas por Copenhague e não se furta de enfrentar a ortodoxia da interpretação predominante desde os primórdios da Teoria Quântica, questionando-a como incompleta, por não gozar de uma descrição mais fundamental da realidade. O antirrealismo de Copenhague introduz elementos aleatórios, violando o determinismo da evolução temporal da imagem ondulatória. O processo de colapso é intrinsecamente probabilístico e não pode ser previsto deterministicamente.

Por fim, destaca-se que as principais consequências filosóficas do experimento mental do gato de Schrödinger são: a) a constatação de problemas epistemológicos advindos de noções como a da superposição dos estados quânticos; b) o papel do observador na Mecânica Quântica; c) a contraintuitividade da noção de colapso da função de ondas; d) a própria coerência lógica de algumas asserções da Mecânica Quântica.

A função deste artigo foi, portanto, indagar, sob a perspectiva de Schrödinger, se a realidade se submete à mera interpretação ou se ela se impõe como aquilo que existe para além da mente do observador. As discussões são muitas, mas capazes de suscitar reflexões no campo da ontologia, epistemologia, lógica e filosofia da linguagem. Pode-se afirmar que o experimento mental do gato de Schrödinger não somente foi capaz de provocar a inquietação filosófica, a ponto de se tornar um instrumento importante para discussões na Filosofia da Ciência e na Filosofia da Física, mas também se serve, na

atualidade, para provocar os físicos à reflexão sobre o que é que se entende por realidade e se tal realidade pode, de fato, ser afetada pelo ato de observação.

Financiamento da pesquisa:

Este artigo contou com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de cessão de bolsa no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Referências

- ARENHART, Jonas Rafael Becker; KRAUSE, D. Identidade, Individualidade e Quase-Conjuntos. *Revista Eletrônica Informação e Cognição*, v. 2, p. 25-39, 2008.
- ARENHART, Jonas Rafael Becker; KRAUSE, D. Quantifiers and the foundations of quasi-set theory. *Principia* (UFSC), v. 13, p. 251-268, 2009.
- ARENHART, Jonas Rafael Becker; Krause, D. Semântica quase-conjuntista e compromisso ontológico. *Cognitio* (PUCSP), v. 10, p. 191-207, 2010.
- ARROYO, Raoni Wohnrath. Felinos Inseparáveis: Considerações Históricas E Filosóficas Acerca do Problema da Medição em Mecânica Quântica. *É: Revista de Ética e Filosofia Política*. Nº. XXVI, v. I, 2023, p. 209-238.
- BAKER, Joanne. *50 ideias de física quântica que você precisa conhecer*. Planeta: São Paulo, 2015.
- BELLER, Mara. ‘Against the Stream’-Schrödinger’s Interpretation of Quantum Mechanics. *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, vol. 28, 3. 1997, p. 421-432.
- BOHR, Niels. Causality and complementarity. *Philosophy of Science*, v. 4, 1937, p. 289-298.
- DA COSTA, Newton Carneiro Afonso; KRAUSE, Décio. Logical and Philosophical Remarks on Quasi-Set Theory. *Logic Journal of the IGPL*, v. 15, p. 421-431, 2007.
- DUARTE, Alessandro Bandeira *et al.* *Realismo e Antirrealismo [recurso eletrônico]* / Alessandro Bandeira Duarte, Alice Bitencourt Haddad e Robinson Guitarrari, (Org.) – Seropédica: PPGFIL-UFRRJ, 2016.
- FRENCH, Steven; KRAUSE, Décio. Remarks on the Theory of Quasi-sets. *Studia Logica*, v. 95, p. 101-124, 2010.
- HEISENBERG, Werner. *Física e Filosofia*. 3. ed. Trad. Jorge Leal Ferreira. Brasília: Editora UnB, 1995.

HOLIK, Federico; JORGE, Juan Pablo; KRAUSE, Décio; LOMBARDI, Olimpia. Quasi-set theory: a formal approach to a quantum ontology of properties. *Synthese* (Dordrecht. Online), v. 200, p. 401, 2022.

HOLTON, Gerald. As raízes da complementaridade. Trad. Dinorah de Oliveira Mendes. In: *Humanidades*, vol. 2, nº 9, out./dez., 1984. p. 49-71.

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

KRAUSE, Décio; SANT'ANNA, Adonai; VOLKOV, Analice. Quasi Set Theory For Bosons And Fermions. *Foundations of Physics Letters*, USA, v. 12, n.1, p. 51-66, 1999.

KRAUSE, Décio. Multisets, Quasi-Sets And Weyl'S Aggregates. *The Journal Of Non-Classical Logic*, Campinas, v. 8, n.2, p. 7-23, 1991.

_____. On a quasi-set theory. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, USA, v. 33, n.3, p. 402-411, 1992.

_____. Why quasi-sets?. *Boletim da Sociedade Paranaense de Matemática*, Maringá, v. 20, n.1/2, p. 73-92, 2003.

_____. *O gato de Schrödinger não está vivo e morto antes da medição: sobre a interpretação dos resultados quânticos*. In: Almeida, E; Costa-Leite, A.; Freire, R. Brasília: *Lógica no Avião*. (Org.). *Lógica no Avião*. Brasília: *Lógica no Avião*, 2019, v. 1, p. 104-122.

_____. Aspectos da indiscernibilidade quântica e da teoria de quase-conjuntos. *Perspectivas*, v. 7, p. 99-119, 2023.

PAIS, Abraham. ‘*Subtle is the Lord...*’ *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982.

PEROVIC, Slobodan. *Schrödinger's interpretation of quantum mechanics and the relevance of Bohr's experimental critique*. Disponível em: <https://www.academia.edu/31729560/Schr%C3%B6dingers_interpretation_of_quantum_mechanics_and_the_relevance_of_Bohrs_experimental_critique> Acesso em: 28/04/2024.

PESSOA JR., Osvaldo. *Conceitos de Física Quântica*. vol. I. 4. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2019.

_____. *O Sujeito na Física Quântica*. Mestrado em Ensino, História e Filosofia das Ciências (UFBA-UEFS). Depto. de Ciências Humanas e Filosofia – Universidade Estadual de Feira de Santana. In: OLIVEIRA, E.C. (org.), *Epistemologia, Lógica e Filosofia da Linguagem – Ensaios de Filosofia Contemporânea*, ISBN 85-7395-055-2, Núcleo de Estudos Filosóficos – UEFS, Feira de Santana, 2001, p. 157-196.

_____. Mapa das Interpretações da Teoria Quântica. In: MARTINS, R.A.; BOIDO, G.; RODRÍGUEZ, V. (orgs.), *Física: Estudos Filosóficos e Históricos*. Campinas: AFHIC, 2006. p. 119-152.

POPPER, Karl Raimund. *A Teoria dos quanta e o cisma na física* / Organização de W.W. Bartley ; 3º Vol. do Pós-escrito à Lógica da Descoberta Científica. Tradução de Nuno Ferreira Fonseca. Publicações Dom Quixote: Lisboa, 1989.

PUTNAM, Hilary. A Philosopher Looks at Quantum Mechanics. In: COLODNY, Robert G (Ed.). *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice-Hall, 1965, p. 75-101.

SCHRÖDINGER, Erwin. Quantização como Problema de Autovalor. *Annalen der Physik*, 385(13), 1926, p. 437-490.

_____. “Die Besonderheit des Weltbilds der Naturwissenschaft”. *Acta Physica Austriaca*, 1, p. 201-245, 1948. Trad. “On the peculiarity of the scientific world-view”. In: *What is life? and other essays*, Doubleday anchor, 1957.

_____. *Science and The Human Temperament*. Londres: George Allen & Unwin Ltd., 1935.

_____. (1935). The Present Situation in Quantum Mechanics. In: TRIMMER, John D. A Translation of Schrödinger’s “Cat Paradox” paper. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. 124, n. 5, oct. 10, 1980, p. 323-338.

_____. *A natureza e os gregos seguido de Ciências e Humanismo*. Lisboa: Edições 70, 1996. Coleção Perfil – História das ideias e do pensamento.

_____. Are There Quantum Jumps? Part II. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 3, No. 11 (Nov., 1952), p. 323-338.

Recebido em: 26/06/2024

Aprovado em: 12/01/2025

Publicado em: 27/02/2026