

REVISTA DESAFIOS

ISSN: 2359-3652

v. 11 n. 3 (2024): Dossiê Temático: Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Universidade Federal do Tocantins. DOI: http://dx.doi.org/10.20873.2024_v3_21

ARTIGO RECEBIDO: 23/11/2023 – APROVADO: 08/04/2024 - PUBLICADO: 22/04/2024

O ANTIRREALISMO ORTODOXO NA AURORA DA MECÂNICA QUÂNTICA

ORTHODOX ANTI-REALISM AT THE BEGINNING OF QUANTUM MECHANICS

EL ANTIRREALISMO ORTODOXO EN LOS ALBORES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Maxwell D. B. de Melo,¹; Eduardo Simões;²*

¹ Curso de Licenciatura em Física. Universidade Federal do Tocantins (UFT), Brasil;

² Curso de Filosofia. Universidade Federal do Tocantins (UFT)., Brasil;

*Correspondência: maxwellmelo@mail.uft.edu.br

RESUMO

O tema do antirrealismo ortodoxo na aurora da mecânica quântica nasce da perspectiva de discutir o problema que envolve o embate entre realismo e antirrealismo nos primórdios da mecânica quântica, especialmente no interior da interpretação de Copenhague, liderada por Niels Bohr e Werner Heisenberg. Em termos gerais, objetiva-se evidenciar pressupostos ontológicos e os conceitos metafísicos empregados nas diversas concepções que compõe a interpretação supramencionada, particularmente, o princípio da incerteza de Heisenberg. A metodologia para tal análise será uma revisão de literatura, portanto, uma pesquisa bibliográfica, baseada no que há de mais atual sobre o tema em epígrafe. O que se intenta com o presente artigo é demonstrar como o realismo e antirrealismo, enquanto perspectivas filosóficas, versam sobre a natureza da realidade e a relação entre conceitos teóricos e observações empíricas. O realismo apresenta uma visão que postula a existência da realidade objetiva e independente das observações humanas e o antirrealismo sustenta que os conceitos teóricos e entidades propostas por teorias científicas não podem ter uma correspondência direta com a realidade, independente das observações. Nesse trabalho o leitor verá uma discussão sobre essas duas vertentes nos primórdios da mecânica quântica e suas consequências para o entendimento do mundo dos *quanta*.

Palavras-chave: Antirrealismo. Incerteza. Mecânica quântica.

ABSTRACT

The theme of orthodox anti-realism at the beginning of quantum mechanics arises from the perspective of discussing the problem involving the clash between realism and anti-realism in the early days of quantum mechanics, especially within the Copenhagen interpretation, led by Niels Bohr and Werner Heisenberg. In general terms, the aim is to highlight the ontological assumptions and metaphysical concepts used in the various conceptions that make up the aforementioned interpretation, particularly Heisenberg's uncertainty principle. The methodology for this analysis will be a literature review, and therefore a bibliographical survey, based on the most up-to-date information on the subject in question. The aim of this article is to demonstrate how realism and anti-realism, as philosophical perspectives, deal with the nature of reality and the relationship between theoretical concepts and empirical

observations. Realism presents a view that postulates the existence of objective reality, independent of human observations, while anti-realism maintains that the theoretical concepts and entities proposed by scientific theories cannot have a direct correspondence with reality, independent of observations. In this paper, the reader will see a discussion of these two strands in the early days of quantum mechanics and their consequences for understanding the world of *quanta*.

Keywords: Antirealism. Uncertainty. Quantum mechanics.

RESUMEN

El tema del antirrealismo ortodoxo en los albores de la mecánica cuántica surge ante la perspectiva de discutir la problemática en torno al enfrentamiento entre realismo y antirrealismo en los inicios de la mecánica cuántica, especialmente en el seno de la interpretación de Copenhague, liderada por Niels Bohr y Werner Heisenberg. En términos generales, se trata de poner de relieve los supuestos ontológicos y los conceptos metafísicos utilizados en las distintas concepciones que conforman la citada interpretación, en particular el principio de incertidumbre de Heisenberg. La metodología para este análisis será una revisión de la literatura, o investigación bibliográfica, basada en la información más actualizada sobre el tema en cuestión. El objetivo de este artículo es demostrar cómo el realismo y el antirrealismo, como perspectivas filosóficas, abordan la naturaleza de la realidad y la relación entre los conceptos teóricos y las observaciones empíricas. El realismo presenta un punto de vista que postula la existencia de una realidad objetiva, independiente de las observaciones humanas, mientras que el antirrealismo sostiene que los conceptos teóricos y las entidades propuestas por las teorías científicas no pueden tener una correspondencia directa con la realidad, independiente de las observaciones. En este artículo, el lector verá una discusión de estas dos vertientes en los inicios de la mecánica cuántica y sus consecuencias para la comprensión del mundo de los cuantos.

Descriptor: Antirrealismo. Incertidumbre. Mecánica cuántica.

INTRODUÇÃO

O presente artigo trata-se do resultado de uma investigação acerca da disputa realismo versus antirrealismo nos primórdios da mecânica quântica. Realismo e antirrealismo são duas perspectivas filosóficas e versam sobre a natureza da realidade e da relação entre conceitos teóricos e observações empíricas. O realismo defende uma visão que postula a existência da realidade objetiva, independente das observações humanas. Os realistas acreditam que os conceitos e entidades teóricas utilizados para descrever o mundo, como átomos, partículas subatômicas ou forças invisíveis, correspondem a elementos reais da existência e têm propriedades predefinidas. Buscam compreender essa realidade subjacente e acreditam que a ciência é uma ferramenta para descobrir verdades sobre o mundo externo. O antirrealismo, por outro lado, sustenta que os conceitos teóricos e entidades propostas por teorias científicas podem não ter uma correspondência direta com a realidade, independente das observações. Os antirrealistas argumentam que a linguagem científica descreve relações observáveis e não necessariamente revela uma verdade sobre a natureza fundamental das coisas. Enfatizam o papel das observações e medições na construção da realidade científica e adotam uma postura hesitante quanto à possibilidade de conhecer a realidade objetiva subjacente à natureza. Essas perspectivas podem se aplicar às várias disciplinas, incluindo a filosofia da ciência, a física quântica, a matemática e outros

campos. A disputa entre realismo e antirrealismo muitas vezes se manifesta nas discussões sobre a interpretação de teorias científicas complexas, como a mecânica quântica, onde a natureza da realidade subjacente aos fenômenos observados é tema de debates filosóficos e científicos.

A natureza desafiadora e paradoxal da teoria quântica em comparação com física clássica, especialmente no que diz respeito à causalidade, à observação e à coordenação espaço-temporal é conhecida por desafiar muitas das intuições comuns sobre como a natureza funciona. Segundo Bohr (1934),

[...] a natureza da teoria quântica nos força a considerar a coordenação espaço-temporal e a asserção da causalidade, cuja união caracteriza as teorias clássicas como aspectos complementares e mutuamente exclusivos da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição (Bohr, 1934, p.55).

Este é um esboço do primeiro enunciado do princípio de complementaridade, nesse caso, entre a coordenação do espaço-temporal e a asserção da causalidade, ou entre a observação e a definição, expresso por Bohr. Ele acaba por se utilizar dessas distinções precedentes para chegar na dualidade onda-partícula: os aspectos ondulatórios (princípio de superposição) e aspectos corpusculares (conservação de energia e momento da luz – e da matéria) são complementares (Pessoa Jr., 2000, p.137). Essa noção de dualidade onda-partícula foi proposta por Louis de Broglie em sua tese de doutorado em 1924, que sugeriu, na época, que a matéria, a exemplo dos elétrons e átomos, exhibe comportamentos ondulatórios, assim como a luz. Bohr desenvolveu essa ideia a partir do seu conceito de complementaridade ao afirmar que os aspectos ondulatórios e corpusculares da natureza são complementares e que um experimento só pode revelar um desses aspectos de cada vez. A manifestação do comportamento onda ou partícula, portanto, depende daquele que projetou o experimento. Esse é um tipo de concepção antirrealista que parece inerente à interpretação ortodoxa – ou interpretação de Copenhague – da mecânica quântica, pois delega ao sujeito do conhecimento a responsabilidade pela manifestação do objeto quântico ora como onda, ora como partícula.

Sabe-se que a mecânica quântica é uma teoria essencial da física que versa sobre o comportamento de sistemas físicos em nível atômico e subatômico. De fato, tal mecânica trata da descrição matemática dos fenômenos físicos que a física clássica não dá conta de explicar, dado o seu caráter indeterminístico. Exemplo do que se afirma é o comportamento dos elétrons, a estrutura de cristais, a modelagem para as partículas subatômicas e a natureza dos campos eletromagnéticos. Nesses casos, o determinismo da física clássica não se aplicava, pois as medidas obtidas de sistemas quânticos são expressas em termos de probabilidades. Todo o desenvolvimento da mecânica quântica teve como suporte a descoberta de Planck de que a energia e a matéria atômica têm como fundamento principal pacotes de energia, denominados quanta.

A teoria quântica é baseada em alguns princípios fundamentais (Heisenberg, 1971), como o princípio da incerteza de Heisenberg, que afirma que a posição e o momentum de uma partícula não podem ser estabelecidos *a priori*, com precisão absoluta, e muito menos medidos ao mesmo tempo, bem como o princípio da superposição, que estabelece que um sistema quântico pode estar em vários estados em um mesmo tempo de medição. Esses dois princípios também estão carregados de antirrealismo. Schrödinger mostrou que a mecânica quântica também concebe o conceito de função de onda como uma descrição matemática da probabilidade de uma partícula subatômica estar em um determinado estado de energia. A função de onda é usada para calcular as propriedades dos sistemas quânticos, como as energias e as taxas de reações químicas. Heisenberg foi um grande opositor dessa teoria, em favor de sua complexa teoria matricial e tridimensional.

A teoria quântica tem profundas implicações para a compreensão do universo e é uma das teorias mais bem testadas na história da física. As principais aplicações incluem tecnologia de semicondutores, a criptografia quântica, a computação quântica e a física de partículas elementares, bem como outras áreas afins como ciências dos materiais, eletromagnetismo, biologia e química. Ainda assim, a mecânica quântica traz consigo uma série de implicações filosóficas para as quais a exigência de reflexão é clara. Tais implicações continuam sendo alvo de intenso debate na comunidade científica, mesmo os físicos concordando que ela é a teoria mais precisa que temos para descrever o comportamento das partículas subatômicas. Heisenberg, tentando evitar conflitos filosóficos atinentes, desenvolveu sua relação de incerteza impondo limites dentro dos quais a concepção de partícula pode ser aplicada (Chibeni, 2005, P. 190), contudo, falhou¹ por não conseguir em distinguir as noções ontológicas e epistemológicas do princípio por ele proposto. Karl Popper (1934), estava de acordo que nada fosse acrescentado nas relações de incerteza até que investigações esclarecessem uma série de questões ontológicas e epistemológicas suscitadas pela mecânica quântica. Isso estava inteiramente alinhado com o pensamento de Einstein, que à época insistia que a mecânica quântica não deveria ser entendida como uma teoria sobre objetos individuais (fótons, elétrons, prótons, etc) e sim sobre *ensembles* estatísticos. A perspectiva de *ensembles* estatísticos está em consonância com a concepção de “dispersão estatística” utilizada por Popper para comprovar que o princípio da incerteza falha em negar a possibilidade de medição simultânea da posição e momentum de uma partícula, dissolvendo, assim, os problemas filosóficos inerentes a ele.

¹ A crítica levantada é que Heisenberg, ao formular o princípio da incerteza, pode ter confundido a limitação do conhecimento humano (aspecto epistemológico) com uma limitação real da natureza (aspecto ontológico). Em outras palavras, Heisenberg argumentou que não podemos conhecer simultaneamente com precisão a posição e o momentum de uma partícula, mas isso não significa necessariamente que a partícula não tenha uma posição e momentum precisos simultaneamente.

Sob vários pontos de vistas, a física quântica versa sobre leis governando aglomerados e não indivíduos. Não são descritas propriedades, mas probabilidades; não são formuladas leis revelando o futuro de sistemas, mas leis governando as alterações de probabilidades no tempo e relativas a grandes aglomerados de entidades (Einstein; Infeld, 1980, p. 236, *apud* Silva, 2014, p.6). Todas essas concepções levam ao antirrealismo que defende que a teoria quântica não descreve o mundo físico de forma objetiva e que suas predições são apenas representações matemáticas e não correspondem a entidades físicas reais. Isso significa que a teoria quântica não afirma a existência de partículas ou campos objetivamente, mas apenas descreve as interações observadas entre sistemas quânticos através de probabilidades. O antirrealismo na mecânica quântica se opõe frontalmente ao realismo, nega a causalidade, que afirma categoricamente, dentre outros pontos de vista, que entidades quânticas, como partículas e campos, existem objetivamente, independentemente da observação.

A proposta antirrealista fundamental da “interpretação de Copenhague” é de que os entes quânticos têm uma natureza ondulatória e corpuscular que são complementares. Ao mesmo tempo que depende de nós interpretarmos qual fenômeno está ocorrendo, e isso depende do tipo de experimento que venhamos a fazer, a motivação experimental dessa interpretação é um conjunto de fenômenos que indicam que os objetos quânticos (fótons, elétrons, etc.) sofrem difração e interferência. Sob o ponto de vista puramente experimental, os mencionados fenômenos não coexistem, a exemplo do efeito fotoelétrico, o efeito Compton e o movimento browniano, que induzem que as entidades quânticas são partículas. Esse enigma, a saber, a natureza dual das partículas (comportamento de partícula e onda) e os resultados de experimentos, como o experimento de dupla fenda, desafiam as intuições clássicas e continuam a intrigar físicos e filósofos. Desde os primórdios do século XX, a dualidade onda-partícula, por exemplo, está na pauta de discussão de estudiosos que tentam desvendar o mistério. Uma tentativa para tal desvelamento é a defesa de que, embora essencialmente ondulatórios, os objetos quânticos parecem por vezes se comportar como partículas porque nessas situações as “ondas” se concentram numa região muito pequena do espaço, formando as famosas singularidades. A teoria que poderia explicar isso é justamente a de Schrödinger, mas não fora elucidada adequadamente do ponto de vista experimental e, ainda, envolveu uma série de dificuldades teóricas e conceituais, como o problema da medição e o colapso da função de onda.

Heisenberg apresentou e defendeu, em sua extensa obra, três formas de realismo: o prático, o dogmático e o metafísico². Todas partilham da crença segundo a qual “nós ‘objetivaremos’ uma

² **Realismo Prático (Realismo Científico):** também conhecido como Realismo Científico, é a posição mais aceita na ciência moderna. Ele afirma que as teorias científicas fornecem descrições úteis e precisas da realidade observada, mas não necessariamente representam uma imagem completa e literal da realidade em si. **Realismo Dogmático (Realismo Incondicional):** também chamado de Realismo Incondicional, é uma posição mais rígida. Ele argumenta que as teorias científicas descrevem com precisão a realidade objetiva, independentemente das observações ou medições. **Realismo Metafísico (Realismo Profundo):** é uma posição que vai além do realismo

afirmação, se mantivermos que seu conteúdo independe das condições sob as quais ela possa ser verificada” (Heisenberg, 1995, p. 64 *apud* Leite e Simon, 2010, p. 223). Logo, o realismo opõe-se à “interpretação de Copenhague”, pois, segundo esta, “não podemos objetivar completamente o resultado de uma observação experimental, e não temos como descrever o que ocorre entre uma observação e outra”³ (Heisenberg, 1995, p. 43 *apud* Leite e Simon, 2010, p. 223).

Todas as discussões entre o realismo e o antirrealismo nos primórdios da mecânica quântica são muito interessantes na filosofia da ciência e na história da física. Os realistas acreditam que as propriedades dos sistemas quânticos são determinadas antes da medição e que as observações simplesmente revelam essas propriedades preexistentes. Nesse contexto, os realistas buscam uma compreensão completa da realidade subjacente e podem estar insatisfeitos com a natureza aparentemente paradoxal da mecânica quântica. A perspectiva antirrealista, por outro lado, sugere que a mecânica quântica não fornece uma descrição completa da realidade independente da observação. Os antirrealistas muitas vezes argumentam que as propriedades quânticas só se tornam definidas quando medidas são realizadas, e que as observações são intrinsecamente ligadas ao processo de medição. Eles acreditam que tentar entender a realidade subjacente à mecânica quântica (ontologia subjacente) é uma abordagem fútil, pois a natureza quântica dos fenômenos não se alinha com nossas intuições baseadas na física clássica.

Subjacentes a essas duas perspectivas gerais, pode-se encontrar variadas interpretações secundárias específicas que representam diferentes abordagens para resolver os desafios conceituais apresentados pela mecânica quântica. Alguns exemplos são: a interpretação de Copenhague, que sugere que as propriedades quânticas não têm valores definidos até que sejam medidas; o realismo modal, que tenta reconciliar o realismo com a mecânica quântica, postulando que a realidade quântica é composta de múltiplos “mundos” ou estados paralelos, onde cada resultado possível de uma medição realmente ocorre em um universo separado; a teoria das variáveis ocultas (teoria de David Bohm), que é uma perspectiva realista que propõe que as propriedades quânticas são determinísticas e preexistentes, mas que estão escondidas de nossa observação. As variáveis ocultas seriam responsáveis por explicar as características aparentemente probabilísticas dos fenômenos quânticos.

Os objetivos do presente artigo, portanto, propõem evidenciar os pressupostos ontológicos das interpretações ortodoxas na aurora da mecânica quântica, elucidando os conceitos metafísicos empregados nessas diversas teorias, por avaliar o quanto o instrumentalismo professado pelas

dogmático. Ele afirma que as teorias científicas não apenas descrevem a realidade, mas também representam a realidade de forma literal, mesmo que essa realidade seja além da nossa capacidade de observação direta. Em outras palavras, o realismo metafísico sustenta que as entidades e conceitos presentes nas teorias científicas realmente existem, independentemente das observações humanas

³ Vale lembrar que Heisenberg era partidário da “interpretação de Copenhague”.

interpretações ortodoxas compromete a inteligibilidade e a descrição realística dos fenômenos ocorridos na escala quântica. Além disso, procura-se discutir a natureza e o valor das teorias que tratam da questão da estrutura do átomo, além de investigar se a teoria quântica favorece o indeterminismo. Intenta-se, por fim, discutir se somente teorias justificam o entendimento e o controle dos sistemas reais que aos poucos vão se sedimentando. Trata-se de uma tarefa difícil, contudo, a discussão proposta dar-se-á à luz da história da física quântica e de resultados por ela alcançados. Sendo assim, espera-se que as contribuições ora apresentadas, advindas de bibliografias pertinentes, bem como de matemática introdutória, com eventuais resultados numéricos, sejam de ajuda inicial aos que desejam se aventurar nesse campo do conhecimento. Como se verá, falta ainda muito trabalho para desvelar o que há de realismo e de antirrealismo em tudo que se produziu em física quântica desde os primórdios dessa ciência no início do século XX.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antirrealismo e realismo são dois termos diametralmente opostos em física e filosofia. Um bom número de renomados cientistas nega que sejam antirrealistas ou realistas, mas, paradoxalmente, defendem posições acerca da realidade dos objetos quânticos que criam a dependência ou não de nós para existirem. Pode ser que uma dessas teorias venha sobrepujar a outra no futuro, criando uma linguagem própria para comunicar os resultados de suas asserções. Contudo, até o presente momento, isso é muito incerto e a física quântica continua a usar a linguagem da física clássica para explicar os fenômenos quânticos. De acordo com a física clássica, o mundo é assim, como o que se vê, independentemente do que se pensa ou se sente sobre ele. O realismo é atrelado a uma abordagem objetiva e empirista do conhecimento, cujo principal objetivo é compreender o mundo por meio da observação e da análise dos fatos e dos dados. É fundamentalmente causal. Para o antirrealismo, por outro lado, o mundo é um universo de conjecturas, possui diversas formas, é multifacetado em um enorme oceano de possibilidades. O antirrealismo sustenta que a realidade é construída por nós e que não é possível afirmar se o mundo é independente de nossas concepções. Em vez disso, o que chamamos de realidade é um produto de nossas crenças, valores e linguagens. Essa é uma abordagem subjetiva e construtivista do universo que é fundamentalmente anti-causal.

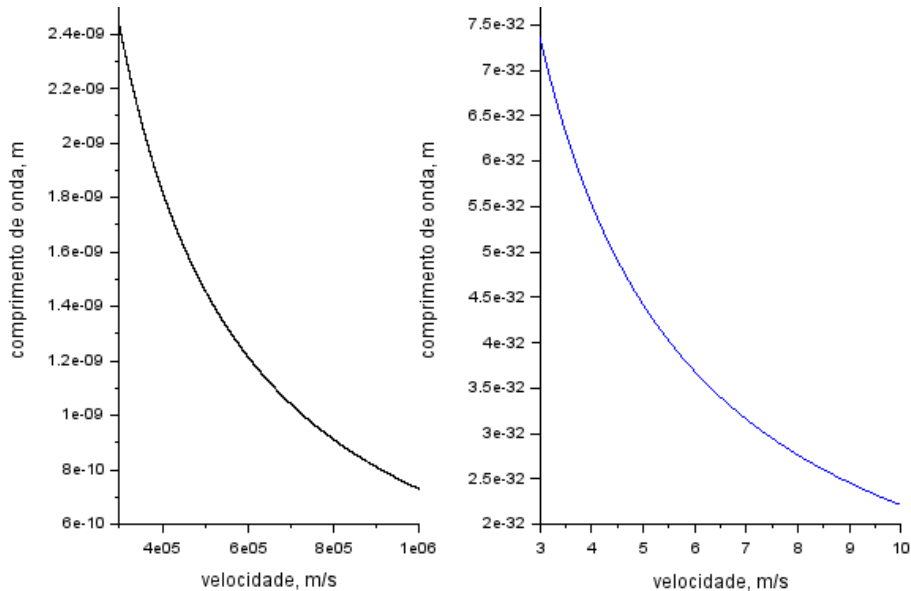
Em meio a essas teorias científicas, cuja pretensão é a do trato objetivo da estrutura última da realidade, a ontologia da mesma, podemos encontrar explicações metafísicas que sustentam o entendimento dessa mesma realidade. A vertente do antirrealismo e o entendimento de sua influência sobre o conhecimento que temos do mundo em escala quântica, pode ser introduzida matematicamente com o objetivo de verificar a constante de Planck. A expressão $\Delta p \cdot \Delta x = h$ se refere a uma das formas de representar o *princípio da incerteza* de Heisenberg em termos de posição e *momentum* de uma

partícula. Nesse caso, “**p ou Q**” representa o *momentum* da partícula, “**x**” representa a sua posição e “**h = 6,63x10⁻³⁴ [J.s]**” é a constante de Planck, que é uma constante universal fundamental da natureza e desempenha um papel imprescindível na física quântica. O princípio da incerteza costuma, portanto, ser expresso da seguinte maneira $\Delta x \Delta Q \geq \frac{h}{4\pi}$. Essa equação indica que, para uma partícula quântica, o produto da incerteza na posição da partícula e a incerteza em seu *momentum* é igual ou superior a $h/4\pi$. Em outras palavras, quanto mais precisamente a posição da partícula é conhecida, menos precisamente seu *momentum* pode ser conhecido, e vice-versa. A equação limita a precisão com que as propriedades de partículas quânticas podem ser medidas. É uma das equações mais conhecidas e importantes na física quântica. A desigualdade de Heisenberg é uma consequência da natureza quântica das partículas, de seu caráter *ensembles* e afeta a medição e a observação de sistemas quânticos cabendo ao observador um papel privilegiado na definição do que é o objeto quântico. Isso se constitui uma forma de antirrealismo, visto que, sendo assim, a realidade dependerá absolutamente do conhecimento humano.

Visando uma breve demonstração prática do papel privilegiado do observador, na **Figura 1** demonstra-se um dos resultados da hipótese de de Broglie onde se compara o comprimento de onda de um elétron de massa **9,1.10⁻³¹ kg** com o comprimento de onda de uma bola de plástico de com cerca de 3 gramas. Note-se que a faixa de velocidade para o elétron é bem superior à da bolinha, gráfico em azul. No entanto, o comprimento de onda da vibração do elétron é bem superior, o que mostra o porquê de ser possível detectá-lo. Observa-se a velocidade a qual a bolinha e o elétron são submetidos. A forma do gráfico é a mesma, ou seja, se aumentarmos a velocidade da partícula seu comprimento de onda de de Broglie diminui. A faixa de velocidade para o elétron é bem superior à da bolinha (gráfico em azul). Dessa forma, o comprimento de onda da vibração do elétron é bem superior. Logo podemos detectá-lo de uma forma mais plena, o que não seria possível para um conjunto como, por exemplo, uma bola. Heisenberg disse⁴ que a relação de incerteza mostra como evitar os conflitos, na medida em que especifica os limites dentro dos quais a concepção de partícula pode ser aplicada. Qualquer uso das palavras posição e velocidade com uma precisão que exceda aquela dada pela desigualdade do princípio da incerteza é desprovida de significado físico (Chibeni, 2005, p.181).

⁴Heisenberg enunciou o princípio de incerteza em 1927 e discutiu essa ideia em várias de suas obras e artigos ao longo de sua carreira.

Figura 1 - Comprimento de onda de um elétron de massa $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg e de uma bola de plástico de com cerca de 3 gramas. O comprimento de onda da vibração do elétron é bem superior, o que mostra porque se consegue detectá-lo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O Algoritmo para gerar os gráficos da **Figura 1** pode ser resumido a seguir:

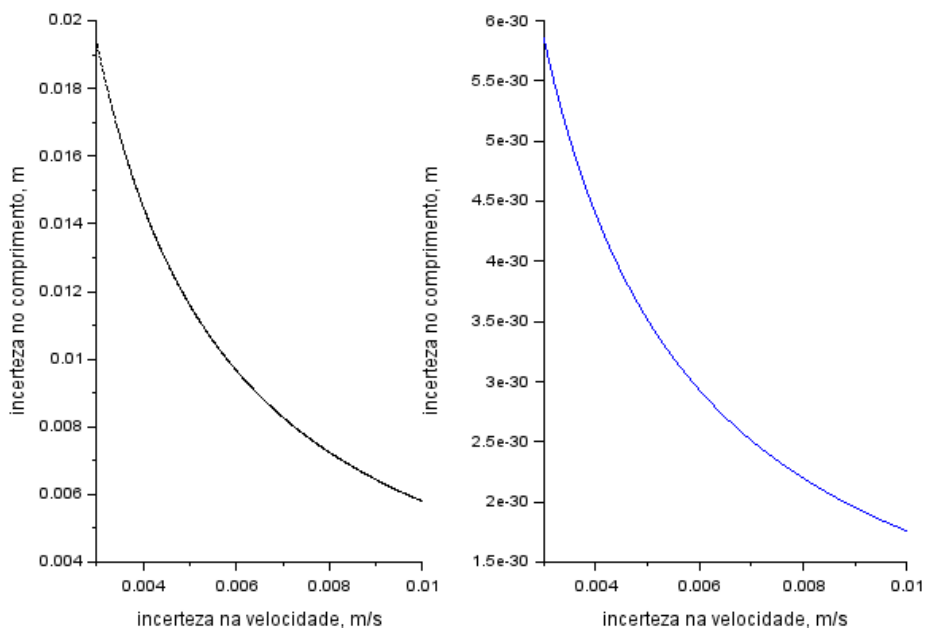
1. A variável h é definida como a constante de Planck, um valor muito pequeno que é aproximadamente igual a $6,63 \times 10^{-34}$ joules segundo;
2. A variável c é definida como a velocidade da luz, que é aproximadamente igual a 3×10^8 metros por segundo;
3. Uma variável é definida como a massa do elétron, que é aproximadamente igual a $9,1 \times 10^{-31}$ quilogramas;
4. Aqui é calculado o comprimento de onda (λ) usando a fórmula da relação entre o comprimento de onda, a constante de Planck (h), a massa do elétron (m_e) e a velocidade da luz (c);
5. Uma faixa de velocidade é definida como um vetor que varia de 3×10^5 a 10×10^5 metros por segundo, com incrementos de 100;
6. Outra faixa de velocidade é definida como um vetor que varia de 3 a 10 metros por segundo, com incrementos de 0,01;
7. Calcula-se o comprimento de onda para cada valor de velocidade;
8. A massa da bola é definida como um valor de massa igual a 3×10^{-3} quilogramas;
9. O comprimento de onda é recalculado usando a nova massa;
10. Calcula-se o comprimento de onda para cada valor de velocidade;
11. Procedimentos para gráficos.

Este algoritmo realiza cálculos elementares de comprimento de onda com base em diferentes velocidades e massas e, ao final, mostra-se o comprimento de onda em função da velocidade para massas diferentes em diferentes faixas de velocidades.

Na **Figura 2** apresentam-se as incertezas nos comprimentos, Δx , a incerteza da variação da posição, para uma incerteza da variação da velocidade, Δv , de uma partícula (um elétron e uma pequena bola de plástico). Aqui, similar ao que foi feito na **Figura 1**, definiu-se uma maneira de expor esse princípio de uma forma algorítmica, onde se pode resumir da seguinte forma tais passos, em um caráter universal:

1. Calcula-se e representa-se graficamente a relação entre a incerteza na velocidade e a incerteza no comprimento de onda, seguindo os princípios da mecânica quântica;
2. Cria-se dois gráficos de dispersão para diferentes valores de incerteza nas faixas de velocidades para as duas massas, mostrando como a incerteza na velocidade afeta a incerteza no comprimento de onda.

Figura 2 - Incertezas no comprimento de onda de um elétron de massa $9,1.10^{-31}$ kg e de uma bola de plástico de com cerca de 3 gramas. As incertezas no comprimento de onda e da vibração do elétron são bem superiores, o que mostra por que é mais fácil detectá-lo. Para a bolinha de plástico, curva em azul, a incerteza é extremamente pequena.



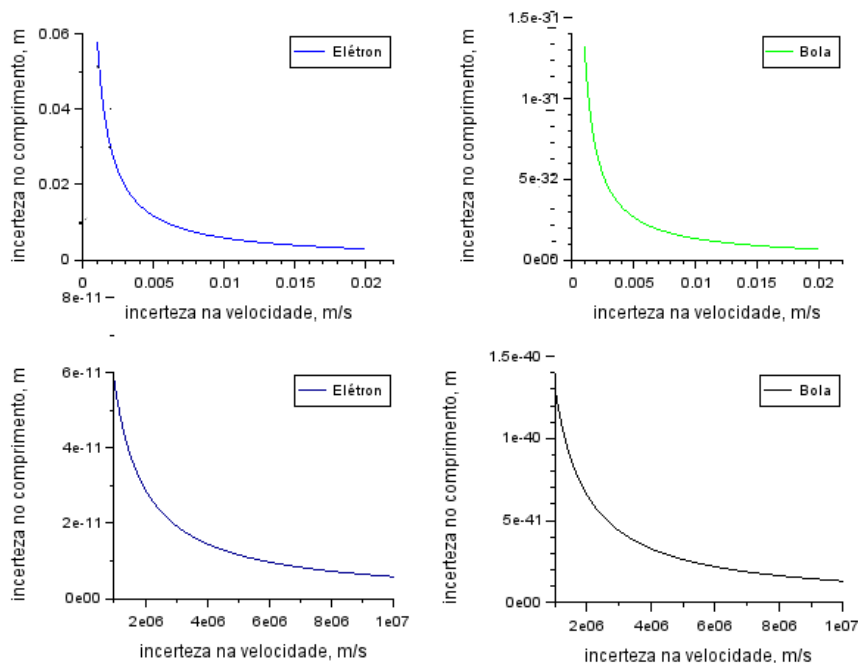
Fonte: Elaborado pelos autores.

Deve-se distinguir, entretanto, entre o princípio da incerteza e as relações de incerteza. O princípio, que se aplica a grandezas não compatíveis entre si (representados por operadores que não comutam, como posição e *momentum*), e exprime o fato de que uma maior previsibilidade nos resultados da medição de um dos observáveis implica uma diminuição na previsibilidade do outro (Pessoa Jr, 2003,

p.77). Já as relações de incerteza referem-se mais geralmente a qualquer relação matemática que descreva a limitação na precisão da medição de certas quantidades físicas. A mais conhecida é a já mencionada desigualdade de Heisenberg, que é uma relação de incerteza específica dentro do contexto da mecânica quântica.

Na esteira da obtenção de resultados aumentou-se o tamanho da bolinha para 400g e visualizou-se o comportamento das incertezas, do elétron e da bolinha (agora um pouco maior), com variações de velocidades relativísticas e normais para o ser humano. Na **Figura 3** visualiza-se que a variação na incerteza da posição é extremamente menor na bolinha do que no elétron, daí o motivo de ser muito mais difícil detectar o caráter dual dos objetos que estão ao nosso alcance visual, isto é, os objetos não quânticos, do que detectar o caráter dual das partículas subatômicas com velocidades relativísticas ou não.

Figura 3 - Um interessante exercício, nos gráficos relaciona-se a incerteza no comprimento e na velocidade para um elétron e uma bola de **400g**. Note-se que obviamente as curvas são do mesmo tipo mas a diferença na magnitude da incerteza da posição para o elétron é astronômica.



Fonte: Elaborado pelos autores

Sobre a ontologia do princípio da incerteza, referimo-nos às implicações filosóficas a ele subjacentes, quais sejam, o princípio da incerteza aponta para a natureza da realidade que, em termos clássicos, é-nos contraintuitiva por defender que existem limites fundamentais para a precisão com que certas propriedades de partículas subatômicas podem ser medidas (Jammer, 1974). Concepção essa, que é questionada por quem defende que é plenamente possível que essas duas propriedades (posição e

momentum) sejam medidas ao mesmo tempo em uma mesma relação, sem que isso se constitua em um problema lógico ou matemático. Basta lançar mãos do instrumento da “dispersão estatística” que toda e qualquer incerteza ou indeterminação será eliminada (Popper, 1989).

As implicações filosóficas princípio da incerteza, portanto, estariam relacionadas com o colocar em xeque a visão clássica determinística do mundo, na qual as propriedades físicas são consideradas fixas e previsíveis, causais. O princípio da incerteza mostra que, em níveis microscópicos, para a estrutura invisível da matéria, a natureza é intrinsecamente incerta e probabilística, é não causal, e sem dúvida alguma é indeterminista. Então, pode-se dizer que indeterminação introduzida pelo princípio também afeta a compreensão da realidade e leva ao antirrealismo. A medição de uma propriedade quântica por um sujeito cognoscível não apenas revela um valor preexistente, mas pode realmente influenciar o resultado da medição. Isso levanta questões sobre a natureza da realidade e sugere que a interação do sujeito com o mundo quântico está inextricavelmente ligada à sua descrição. Como se disse, essas ideias levaram a várias interpretações filosóficas da física quântica, como a interpretação de Copenhague, a interpretação de muitos mundos e a interpretação de variáveis ocultas. Essas interpretações tentam malograr as implicações do princípio da incerteza e reconciliá-las com nossa compreensão mais ampla do mundo (Popper, 2007). O antirrealismo científico sustenta que as teorias científicas são apenas ferramentas úteis para descrever e prever fenômenos, mas não devem ser interpretadas como representações verdadeiras da realidade. Sendo assim, as teorias científicas são apenas modelos convenientes que funcionam dentro de determinados contextos e têm utilidade prática, mas não devem ser consideradas como correspondendo a uma realidade objetiva. O antirrealismo metafísico, por sua vez, questiona a existência de entidades e objetos independentes da linguagem e da mente. De acordo com essa perspectiva, as entidades e propriedades que atribuímos à realidade são construções linguísticas e conceituais que variam de acordo com diferentes sistemas de pensamento e linguagens (Jammer, 1974). Assim, a realidade é vista como algo subjetivo, relativo, sem fronteiras bem definida e é moldada pelos nossos próprios conceitos e formas de representação.

Uma das principais críticas ao antirrealismo é a sua tendência a negar a possibilidade de conhecimento objetivo sobre o mundo, o que pode levar ao misticismo. De fato, essa vertente não nega a possibilidade de conhecimento, nega sim, a possibilidade da realidade do objeto sem que esta seja determinada pelo sujeito que a conhece. Os críticos⁵ mais agudos argumentam que, ao rejeitar a existência de uma realidade externa independente da mente, o antirrealismo pode levar ao relativismo extremo, minando a possibilidade de uma busca pela verdade e de um conhecimento fundamentado,

⁵ Karl Popper, Richard Dawkins (biólogo evolucionista), John Bell, Steven Weinberg (físico teórico), Albert Einstein, dentre outros. Entretanto, é importante notar que o debate entre realismo e antirrealismo é uma questão filosófica em andamento e a posição de um indivíduo muitas vezes depende de sua interpretação da filosofia da ciência e da natureza da realidade científica.

levando-nos ao perigoso mundo das crendices. No entanto, os defensores⁶ do antirrealismo argumentam que ele oferece uma abordagem mais humilde e contextualizada do conhecimento e da realidade, o que por si só é algo discutível. Destacam que as teorias científicas, por exemplo, são revisadas e modificadas ao longo do tempo, o que mostra que nosso conhecimento está sempre sujeito a mudanças e revisões. Além disso, o antirrealismo também enfatiza a importância das perspectivas individuais e sociais na construção da realidade, reconhecendo a influência dos valores, das crenças e dos contextos culturais e da nossa compreensão do mundo (Rosenkranz, 2022). O antirrealismo argumenta que o conhecimento também é uma construção social e interpretativa e que a realidade é moldada pelas nossas concepções. Essa perspectiva desafia as concepções tradicionais de conhecimento objetivo e busca uma compreensão mais contextualizada e flexível da realidade, e em vez da rigidez que o método científico que nos levou nos últimos séculos aonde estamos, temos um mundo de possibilidades ainda não bem definidas pela frente. O antirrealismo é o fundamento da mecânica quântica e tem seu apogeu no desenvolvimento do princípio da incerteza de Werner Heisenberg.

CONCLUSÃO

O princípio da incerteza lançou a base do antirrealismo no início do século passado e não é uma filosofia em si, mas uma teoria científica fundamental da física quântica. Foi formulado por Werner Heisenberg como um princípio físico em 1927 e faz parte do arcabouço teórico que descreve o comportamento das partículas subatômicas. Embora o princípio da incerteza tenha implicações filosóficas significativas e tenha sido objeto de discussões filosóficas, ele não é, por assim dizer, uma filosofia.

A filosofia da física quântica envolve a análise das implicações filosóficas da teoria quântica e de toda a metafísica nela envolvida. Examina questões como a da natureza da realidade, a relação entre o observador e o observado, entre os observáveis quânticos e suas relações com a natureza da vida das pessoas, a interpretação das equações quânticas, além das implicações ontológicas e epistemológicas da teoria quântica. A filosofia da física das partículas aborda as questões filosóficas decorrentes da natureza probabilística, indeterminada e não local da física quântica, incluindo o princípio da incerteza.

Embora o princípio da incerteza seja um princípio científico formulado dentro do campo da física, envolvendo o método científico, sua compreensão e interpretação têm implicações filosóficas mais amplas que foram exploradas neste trabalho. O princípio da incerteza desempenha um papel central na mecânica quântica, pois questiona a possibilidade de se conhecer simultaneamente a posição e o *momentum* de uma partícula subatômica. No contexto do antirrealismo, que questiona a natureza

⁶ Niels Bohr, Werner Heisenberg, Richard Feynman foram antirrealistas com grande influência no pensamento humano no século passado.

objetiva e independente da realidade, o princípio da incerteza desafia a visão tradicional de uma realidade objetiva e observável e levanta questões inerentes às relações entre o observador e o observado. Neste artigo, foram feitas simulações elementares com o objetivo de fornecer *insights* sobre as implicações do princípio da incerteza na perspectiva antirrealista. Tais resultados evidenciam as limitações intrínsecas à precisão das medidas em nível subatômico, como previstas pelo princípio da incerteza, e levantam dúvidas sobre a possibilidade de se afirmar a existência de uma realidade objetiva e independente da observação, pois, do contrário, obteríamos resultados semelhantes para um elétron e uma bolinha. O princípio da incerteza sugere que a realidade é fluida e dependente do contexto do observador.

Finalmente, reforça-se a complexidade do debate antirrealista na filosofia da ciência ao incorporar o princípio da incerteza de Heisenberg como um elemento central e subjacente às discussões sobre a realidade. As simulações demonstraram de uma forma incipiente como a incerteza inerente à natureza quântica do mundo desafia a concepção tradicional de uma realidade objetiva e destaca a importância do papel do observador na construção do conhecimento científico. Isso leva à necessidade de se desenvolver uma abordagem mais cautelosa e reflexiva em relação à natureza da realidade em níveis fundamentais. Missão que deverá ser enfrentada por todos aqueles que pretendam adentrar neste estimulante mundo que é o do comportamento dos objetos quânticos.

AGRADECIMENTO

Este resultado de pesquisa só foi possível com o apoio da Universidade Federal do Tocantins (UFT) e com o aporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) os quais agradecemos sobremaneira.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

BIBLIOGRAPHY

- BOHR, N. **Atomic Theory and the Description of Nature**. Cambridge University Press, 1934.
- CHIBENI, S. S. **Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 2, p. 181-192, 2005.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. Trad. Giasone Rebuá. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1980.
- HEISENBERG, W. **Diálogos Sobre Física Atômica**. Trad. José Cardoso Ferreira. São Paulo: Editorial Verbo, 1971.
- JAMMER, M. **The Philosophy of Quantum Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica. *Scientiæ Studia*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-41, 2010.

PESSOA JR, O. **O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica**. Trad. de “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, *Nature* 121, 580-90, 1928, Trad. e notas de PESSOA JR, O. *In: Fundamentos de Física I – Simpósio David Bohm*. Org: PESSOA JR, O. São Paulo, Livraria da Física, p. 135-159, 2000.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

POPPER, K. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 2007.

POPPER, K. **A Teoria dos Quanta e o Cisma na Física**: pós-escrito à Lógica da Descoberta Científica. v. 8. Trad. Nuno Ferreira da Fonseca. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1989.

POPPER, K. **Quantum Theory and the Schism in Physics**. *Die Naturwissenschaften*, v. 22, 1934. p. 807.

ROSENKRANZ, S. **Realism and Anti-Realism**. Oxford Bibliographies, 2022. Disponível em: <https://www.oxfordbibliographies.com/>. Acesso em: 07 set. 2023.

SILVA, V. C. O “**Princípio De Incerteza**” de Werner Heisenberg e suas Interpretações Ontológica, Epistemológica, Tecnológica e Estatística. *Scientiarum Historia*, v. 7, 2014. p. 1-8.