

UMA INTERPRETAÇÃO DA MECÂNICA QUÂNTICA A PARTIR DA FILOSOFIA CLÁSSICA

Roberto dos Santos Menezes Júnior¹⁵⁴

Resumo: A física do século XX nos legou uma das teorias mais precisas da história da ciência: a mecânica quântica. Contudo, ao lado de seu êxito matemático e preditivo, surgiram profundas questões filosóficas, levando à revisão de noções clássicas da lógica e da física newtoniana no domínio subatômico. Desde então, multiplicaram-se interpretações filosóficas da teoria, enquanto sua estrutura matemática cada vez mais se consolidava. No início do presente século, o físico norte-americano Wolfgang Smith propôs uma interpretação da mecânica quântica baseada no resgate da filosofia clássica, por ele intitulada de “perene”, isto é, uma interpretação advinda da retomada de elementos centrais da tradição platônico-aristotélico-tomista. Este ensaio contextualiza os problemas interpretativos da mecânica quântica, apresenta alguns de seus conceitos fundamentais e expõe essa nova interpretação de Smith.

Palavras-chave: mecânica quântica; interpretações; filosofia antiga; filosofia da natureza.

Abstract: Twentieth-century physics bequeathed us one of the most precise theories in the history of science: quantum mechanics. Yet, alongside its mathematical and predictive success, profound philosophical questions emerged, leading to a revision of classical notions of logic and Newtonian physics within the subatomic domain. Since then, philosophical interpretations of the theory have multiplied, even as its mathematical structure became increasingly consolidated. At the beginning of the present century, the American physicist Wolfgang Smith proposed an interpretation of quantum mechanics grounded in the recovery of the classical philosophy of Aristotle, Plato, and Thomas Aquinas, connected to what he called the “perennial philosophy.” This essay contextualizes the interpretative problems raised by quantum mechanics, presents some of its fundamental concepts, and expounds Smith’s new interpretation.

Keywords: quantum mechanics; interpretations; ancient philosophy; philosophy of nature.

¹⁵⁴ Professor doutor do Instituto Federal da Bahia (IFBA) – campus Salvador. E-mail: rsmjr@ifba.edu.br.

Parte I – Acerca da Mecânica Quântica

1. Introdução

A virada do século XIX para o XX trouxe à física uma revolução talvez tão impactante quanto a Revolução Científica de trezentos anos antes, mas de natureza oposta: se a primeira desvelou o mundo visível, a segunda revelou um domínio subatômico que parecia resistir à compreensão clássica, mostrando-se muito diferente do que se esperava encontrar. Essa segunda revolução foi o advento da mecânica quântica (MQ).

Essa nova teoria física abalou noções do senso comum, desafiou a física clássica newtoniana e levou até mesmo a lógica clássica, com seu princípio de não contradição, a ser reconsiderada. Seu impacto foi tão profundo que mobilizou não apenas físicos, mas também filósofos, atraídos por esse fértil campo de investigação.

Nas páginas que se seguem faremos uma brevíssima abordagem, predominantemente conceitual, sobre o que de tão fantástico e exótico há na MQ, responsáveis por tantas discussões desde o seu surgimento. Veremos também como essas novas ideias se contrapõem às nossas noções clássicas acerca da física e do mundo que nos cerca. Em seguida, apresentaremos, ainda brevemente, a principal interpretação dessa teoria, a da *Escola de Copenhague* ou *interpretação ortodoxa*. Essa abordagem será um tanto simplificada, a fim de que o presente texto se torne, dessa maneira, acessível a um público não especializado. Na sequência, apresentarei uma interpretação da MQ, ainda pouco conhecida nos meios acadêmicos, baseada na filosofia aristotélico-tomista, elaborada pelo físico norte-americano Wolfgang Smith (1930-2024). Por fim, tecerei alguns comentários sobre essa interpretação.

2. Um breve histórico sobre a mecânica quântica¹⁵⁵

Começemos por tratar de alguns pontos importantes acerca dos fenômenos quânticos dentro do seu desenvolvimento histórico. São eles: a quantização da energia, a dualidade onda-partícula, a natureza probabilística, o princípio de incerteza e o colapso da função de onda.

2.1 O problema da radiação do corpo negro e a quantização da energia

¹⁵⁵ Grande parte dos aspectos históricos desta seção foram extraídos da obra: *História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*, de R. Martins e P. Rosa (2014).

Em 1901, Lord Kelvin, em um artigo intitulado “Nuvens do século dezenove sobre a teoria dinâmica do calor e da luz”, proferiu a seguinte sentença:

A beleza e clareza da teoria dinâmica, que coloca calor e luz como modos de movimento, está presentemente obscurecida por duas nuvens. I. A primeira apareceu com a teoria ondulatória da luz, desenvolvida por Fresnel e o Dr. Thomas Young; envolvendo a questão de como pode a Terra mover-se através de um sólido elástico, como o é essencialmente o éter luminífero? II. A segunda é a doutrina de Maxwell-Boltzmann sobre a equipartição de energia. (KELVIN, 1901)

Esse trecho é emblemático pois demonstra o sentimento que os físicos dessa época tinham sobre o desenvolvimento das teorias físicas, especialmente após a grande síntese ali recentemente obtida por James Maxwell com a teoria eletromagnética, na qual se fundem a óptica, a eletricidade e o magnetismo por meio de quatro famosas equações. Nessa época, a partir dessa grande fusão, cria-se que tudo acerca do mundo físico estava descoberto. Se Galileu Galilei fosse vivo a essa época, possivelmente teria dito: “finalmente, lemos o livro da Natureza”. Contudo, ao afastarmos essas nuvens, percebeu-se que os problemas eram ainda mais profundos do que se imaginava. Não só uma nova física passou a surgir, mas esta desafiava pilares já estabelecidos e firmes da sua antecessora clássica. Mas o que são essas nuvens a que Kelvin se refere?

A primeira, trata do problema da detecção de um meio no qual a luz se propagaria e no qual se dariam os fenômenos eletromagnéticos, o éter luminífero, que foi atacado por A. Einstein dando origem à *teoria da relatividade especial* (EINSTEIN, 2020), cujo teor não nos interessa neste ensaio. A segunda nuvem referida por Kelvin trata-se do problema da explicação da radiação emitida por um *corpo negro*, um objeto teórico que seria um perfeito emissor de energia radiante e também um perfeito absorvedor, absorvendo, sem refletir nada, toda radiação nele incidente (daí o adjetivo “negro”)¹⁵⁶. Em 1879, o físico esloveno Josef Stefan (1835-1893) deduziu, a partir de resultados experimentais, que a potência P (energia irradiada por segundo) de um corpo negro é diretamente proporcional à sua temperatura T elevada à quarta potência e também diretamente proporcional à área A da superfície emissora. Anos mais tarde, em 1884, o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) deduziu a lei que Stefan havia obtido experimentalmente, agora de forma teórica, utilizando a termodinâmica estatística. Essa lei passou a se chamar lei de Stefan-Boltzmann e a escrevemos da seguinte forma:

¹⁵⁶ Idealmente, podemos imaginar um corpo negro como corpo oco, de paredes grossas, com uma pequena entrada por onde a radiação entra. Ao entrar, essa radiação incide nas paredes onde é absorvida e refletida em direção a outro ponto da parede, onde o processo se repete. Uma vez que a entrada é bem pequena, a radiação que nele entra não encontra o caminho de saída, ficando totalmente nele retida.

$$P = \sigma AT^4, \quad (1)$$

onde a constante σ é uma constante universal chamada constante de Stefan-Boltzmann. Assim, acerca da energia total irradiada pelo corpo negro a questão estava fechada, mas o que dizer sobre a energia irradiada por frequência? Qual a função que vincularia a frequência à potência correspondente emitida?

Tentativas teóricas de encontrar essa função já haviam sido feitas por Wihelm Wien, em 1893, e por Lorde Rayleigh, em 1900. Contudo, a primeira só se ajustava bem aos dados experimentais para grandes frequências e a segunda, ao contrário, para pequenas frequências. Nessas tentativas estavam implícitas, como não poderia ser diferente, hipóteses clássicas, especialmente a de que a energia na cavidade do corpo negro deveria se distribuir continuamente. A partir dessa hipótese, e da distribuição de Maxwell-Boltzmann¹⁵⁷, obtinha-se a energia média da radiação aprisionada no corpo e por meio dessa a lei da radiação emitida em função da frequência.

Ainda em 1900 o físico alemão Max Planck buscou resolver o problema de uma forma diferente. Sabendo dos resultados obtidos por Wien e Rayleigh, procurou uma função que fosse um meio termo entre eles, ou seja, uma função que no limite de grandes frequências convergisse à lei de Wien e que no limite oposto, o das pequenas frequências, convergisse à lei de Rayleigh. Nesse processo foi necessário lançar uma hipótese audaciosa: a de que a energia retida no corpo negro não estaria distribuída continuamente, mas de forma discreta, em pequenos pacotes de energia (*quanta*), cuja energia seria proporcional à frequência da radiação (ν). Matematicamente,

$$E = h\nu. \quad (2)$$

A constante de proporcionalidade h passou a ser chamada de constante de Planck em sua homenagem e aparece em absolutamente todo problema que envolve a física quântica.

No momento da obtenção da equação correta para a radiação do corpo negro, a lei de Planck, este não se preocupou em interpretar a *quantização* da energia por ele postulada. Posteriormente, contudo, o próprio Planck tentou reobter a sua lei abrindo mão dessa hipótese (a da quantização da energia), porém, sem sucesso. Todas as tentativas de deduzir essa lei que

¹⁵⁷ Essa distribuição nos diz como a energia de um gás está estatisticamente distribuída. Em geral, quanto maior a energia, menor a probabilidade de alguma partícula desse gás tê-la. No caso do corpo negro, o “gás” seriam as ondas eletromagnéticas nele confinadas.

lograram êxito, entre elas feitas por Einstein e Louis De Broglie (de quem logo falaremos) também supuseram a quantização¹⁵⁸.

As pequenas nuvens de Kelvin começam a mostrar o que estava o novo universo que estava oculto.

2.2 O efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por um condutor quando este é iluminado, preferencialmente, por radiação eletromagnética de alta frequência, como a ultravioleta. Este fenômeno foi a primeira evidência da natureza corpuscular da luz e, curiosamente, foi observado pela primeira vez quando entre 1886 e 1888, Heinrich Hertz (físico alemão) provou a existência de ondas eletromagnéticas. Na ocasião da descoberta, Hertz notou que surgiam faíscas (emissão de elétrons) nas antenas receptoras e que estas estavam relacionadas com a luz emitida pelas emissoras. Investigações posteriores, especialmente as do físico Philipp Lenard (1862-1947), mostraram que a energia dos elétrons emitidos devido à incidência da luz dependia da frequência desta, não da sua intensidade, ou seja, luz intensa e luz fraca forneciam a mesma quantidade de energia aos elétrons mais energéticos, o que é um absurdo do ponto de vista da teoria eletromagnética de Maxwell (SUTTINI *et al.*, 2024).

Em um artigo de 1905, intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e transformação da luz”, Albert Einstein propõe que o problema do corpo negro acima apresentado e o do efeito fotoelétrico (geração de raios catódicos, como era chamado), seriam mais facilmente resolvidos se fosse assumido que a energia luminosa estivesse discretamente distribuída em *quanta* de energia. Em suas palavras:

Em particular, a *radiação de corpo negro*, a *fotoluminescência*, a *geração de raios catódicos a partir da luz ultravioleta* e outros fenômenos associados à geração e transformação da luz parecem ser melhor modelados ao se assumir que a energia da luz está distribuída de modo descontínuo no espaço. De acordo com essa concepção, a energia de uma onda luminosa emitida por uma fonte pontual não se espalha continuamente por volumes cada vez maiores, *mas consiste em um número finito de quanta de energia* que estão espacialmente localizados em pontos do espaço, movem-se sem se dividir e são absorvidos ou gerados apenas como um todo. (tradução e grifos nossos) (EINSTEIN, 1905)

¹⁵⁸ Ao leitor que tiver maior interesse nesse desenvolvimento, indico a obra “História da Física Quântica”, de Roberto Martins e Pedro Rosa. Os primeiros capítulos tratarão das tentativas de obtenção da lei da radiação espectral do corpo negro (MARTINS, R. A. e ROSA, P. S. *História da Teoria Quântica: a Dualidade Onda-partícula, de Einstein a De Broglie*, 2014).

A partir de uma equação similar à da quantização de energia de Planck (equação (2)), agora aplicada à radiação eletromagnética livre, de modo que esta seria não mais contínua, mas caracterizada por “um número finito de quanta de energia que estão espacialmente localizados em pontos do espaço” que “movem-se sem se dividir e são absorvidos ou gerados apenas como um todo”, Einstein deduz a lei de Planck e também explica os resultados experimentais dos experimentos que visavam investigar o efeito fotoelétrico.

Durante muito tempo Einstein defendeu que a luz seria composta por corpúsculos (mais tarde denominados de *fótons*) e que a teoria de Maxwell precisaria ser revista. Contudo, a sua concepção corpuscular não se coadunava com os fenômenos claramente ondulatórios, como os da difração e interferência. Ao contrário do que se é amplamente divulgado, ele não defendia uma natureza dual para a luz, mas, ao menos inicialmente, apenas uma corpuscular.

Coube ao francês Louis De Broglie, em 1924, propor a dualidade onda-partícula, não somente para a luz, mas para todo ente físico. Naquele ano ele apresentou, como tese de doutorado, a síntese de anos de estudos e publicações acerca desse tema: para ele, todos os entes físicos apresentariam natureza dual: seriam onda e partícula simultaneamente, fossem estes elétrons, prótons ou luz e, portanto, teriam de obedecer às seguintes relações (chamadas hoje de postulados de De Broglie):

$$E = h\nu \text{ e } p = \frac{h}{\lambda}. \quad (3)$$

A pergunta que logo surge é a seguinte: como algo pode possuir simultaneamente naturezas tão distintas, de onda e partícula? A resposta dada por De Broglie era a de que cada partícula seria conduzida por uma onda a qual lhe estaria associada, como um surfista na onda do mar. Necessitava-se, contudo, de se explicar que tipo de onda carregaria o elétron, já que para o fóton, a onda seria a da própria radiação eletromagnética. Além disso, essa onda hipotética associada às partículas não carregaria nenhuma energia, estando esta concentrada na região limitada pela própria partícula, enquanto a onda poderia se espalhar por todo o espaço.

2.3 A interpretação probabilística e princípio de incerteza

Em 1926, o físico alemão Max Born propôs uma nova interpretação para a função de onda de De Broglie, a que seria adotada pela Escola de Copenhague. Para ele, diferentemente do que acreditavam De Broglie e Schrödinger (que aparecerá ainda na história), as ondas de matéria (que representaremos doravante pela letra grega *psi*: Ψ) não teriam realidade física, mas

estariam somente associadas à probabilidade de encontrar uma partícula em certa região do espaço. Desse modo, nas regiões em que o quadrado do módulo da função de onda ($|\Psi|^2$) fosse máximo, a probabilidade de a partícula ser ali encontrada também o seria. Essa mesma natureza probabilística passou a valer para a energia e outros observáveis físicos: mesmo conhecidas as condições iniciais do sistema quântico em um tempo t_0 , antes da medição não se pode prever qual o valor que tais observáveis possuirão ao serem medidos em um $t > t_0$, mas tão somente o *valor esperado* para uma medição (que equivale a uma média calculada sobre diversos sistemas) ou a *probabilidade* de se obter certo valor. Todos esses resultados dependem do conhecimento da função de onda $\Psi(x, t)$ para o sistema em estudo. Notemos que aqui se apresenta pela primeira vez o *indeterminismo* quântico¹⁵⁹.

Inconformado com os rumos que a teoria quântica tomava, Einstein escreveu uma carta a Born na qual estava uma frase que eternizaria esse seu inconformismo:

A mecânica quântica é muito impressionante. Mas uma voz interior me diz que ela ainda não é a [teoria] verdadeira. A teoria diz muito, mas não nos aproxima do segredo do ‘velho’. De qualquer forma, estou convencido de que Ele não joga dados. (EINSTEIN, 1926, p. 90) (tradução nossa)

Adicionando mais dramaticidade à questão, no ano seguinte, um aluno de Born de nome Werner Heisenberg, chegou a um postulado que acabou por enterrar toda pretensão determinística laplaciana¹⁶⁰. Para Heisenberg, ainda que fosse possível determinar a posição da partícula com extrema precisão (incerteza nula), sua velocidade estaria completamente indeterminada (incerteza infinita) nesse mesmo instante e vice-versa. Ora, como o conhecimento simultâneo da posição e da velocidade é necessário para a obtenção de uma equação do movimento, decorre do princípio de incerteza de Heisenberg que, para partículas quânticas, não há trajetórias determináveis previamente, podemos apenas prever a probabilidade de ela ir por este ou aquele caminho.

Um entendimento do princípio da incerteza não é difícil: toda medida requer alguma interação entre o medidor e o medido. No mundo macroscópico, na imensa maioria das vezes, a medição de algo não afeta o que está sendo medido, como, por exemplo, a onda

¹⁵⁹ Na física newtoniana, dadas as condições iniciais de um sistema mecânico (por exemplo, posição e velocidade iniciais: x_0 e v_0), podemos saber para qualquer tempo futuro a posição do móvel (pela equação do movimento uniforme, por exemplo, $x(t) = x_0 + v_0 t$). Já na MQ nem sempre é possível se conhecer com certeza a posição de uma partícula quântica, mas somente a probabilidade de que ela esteja em certa região, uma vez que nos é impossível conhecer com incerteza nula as condições iniciais do sistema – este é o cerne do chamado *princípio da incerteza*, de que falaremos a seguir.

¹⁶⁰ Laplace teria levado ao extremo o determinismo decorrente da física newtoniana ao afirmar que se houvesse uma inteligência capaz de saber, em determinado instante, as posições e velocidades de todas as entidades do universo, esta poderia então conhecer tudo sobre o seu passado, presente e futuro.

eletromagnética do radar não altera a velocidade do carro em que reflete. No mundo quântico, porém, as coisas não são assim; determinar a posição ou velocidade de um elétron requer jogar sobre ele fótons, os quais colidirão e mudar seu estado de maneira descontrolada, como em um choque a esmo entre bolas de bilhar¹⁶¹.

2.4 A equação de Schrödinger e o colapso da função de onda

O conhecimento da função de onda de um sistema quântico passou a ter importância vital, pois sem ela seria impossível falar qualquer coisa sobre o sistema em estudo¹⁶². Restava apenas a questão de como se obter uma função de onda para cada sistema quântico¹⁶³.

Ainda em 1926, a partir de considerações sobre a conservação da energia (na sua formulação não relativística) e dos postulados de De Broglie, o austríaco Erwin Schrödinger obteve a sua famosa “equação de onda”¹⁶⁴ (que hoje leva o seu nome), a partir da qual, resolvida para certa energia potencial, é possível obter a função de onda do sistema:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x, t) + U(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

Essa equação possui natureza linear, isso quer dizer que admite como solução uma combinação linear de soluções. Por exemplo, em sistemas cuja energia é discreta, cada função correspondente a um certo valor de energia possível do sistema (E_n) é uma solução e, portanto, da sua natureza linear, a combinação linear dessas soluções (soma dessas funções multiplicadas por uma constante) também é uma solução:

$$\Psi(x, t) = \sum_n c_n \psi_n(x) e^{-iE_n t/\hbar} \quad (5)$$

Com isso, a solução de um sistema quântico pode não ser unívoca, mas uma combinação de soluções prováveis, cuja probabilidade é estimada a partir da constante c_n . Então, qual o estado do sistema antes da medição? A resposta dada pela interpretação de Copenhague é:

¹⁶¹ Essa é uma interpretação dada pelo próprio Heisenberg, porém, como veremos adiante, na interpretação ortodoxa não podemos sequer afirmar que a partícula possuía posição e velocidade antes da mediação, como aqui é subentendido.

¹⁶² Podemos, grosseiramente, dizer que tal qual a equação do movimento $x(t)$ está para um sistema regido pela mecânica clássica, assim está a função de onda $\Psi(x, t)$ para a teoria quântica. Sem elas, nada é possível saber acerca do sistema físico estudado.

¹⁶³ Ainda utilizando nossa analogia anterior, essa equação funcionaria como uma “segunda lei de Newton” para o MQ, através da qual seria possível se obter $\Psi(x, t)$ (no caso da mecânica clássica, o que se obtém é $x(t)$).

¹⁶⁴ As aspas aqui se justificam, pois, a equação de Schrödinger não é de fato uma equação de onda nos moldes da teoria ondulatória, podendo, inclusive, serem funções complexas.

nenhum. Mesmo conhecida a solução da equação de Schrödinger para certo sistema, não se pode falar sobre o seu estado antes da medição, mas somente depois. O máximo que podemos prever é a probabilidade $P_n = |c_n|^2$ de que, ao se efetuar uma medida, o sistema colapse para o estado Ψ_n , cuja energia é E_n ¹⁶⁵. Esse fenômeno é o que caracteriza o *colapso da função de onda*.

O colapso não se dá apenas no âmbito dos observáveis físicos, associados, portanto, a atributos das partículas que compõem um sistema (energia, posição, velocidade etc.), mas também ocorre em um âmbito ontológico. Consideremos o aparato experimental da dupla fenda (ilustrado na figura 1 abaixo). Se lançarmos elétrons, sem detectar por qual fenda estes passaram, teremos como resultado o que seria esperado para uma onda, com franjas de máximo e mínimo de interferência. Contudo, se tentamos detectar por qual fenda o elétron passou, a imagem será aquela esperada para bolinhas, ou seja, o comportamento será corpuscular.

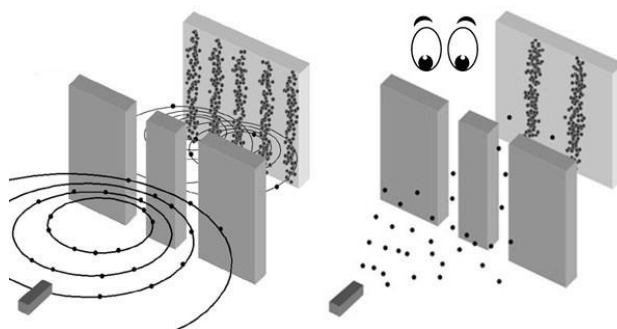


Figura 1: À esquerda, a difração de elétrons sem tentativa de detecção do elétron. À direita, o resultado “observando-se” por onde o elétron passou. (Fonte: OH, J. Y. *et al.*, 2023)

Podemos, dessa forma, concluir que o ato de medir ou não a passagem do elétron por uma fenda (que frequentemente chamamos de *observação*) seleciona a sua natureza. Antes, ele estaria em uma superposição onda-partícula¹⁶⁶, que pode ser representada pela equação:

$$\Psi_{\text{elétron}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Psi_{\text{onda}} + \frac{1}{\sqrt{2}}\Psi_{\text{partícula}}. \quad (6)$$

Ao passar pela fenda, função de onda do elétron *colapsa* para um estado que revelaria sua natureza de onda *ou* partícula. David Bohm criticou esse colapso dizendo que não nos é

¹⁶⁵ Após a medição, se obtemos, por exemplo, a energia E_2 , o sistema passará a existir, *com certeza*, no estado Y_2 a partir desse instante.

¹⁶⁶ Segundo a interpretação ortodoxa, não é correto afirmar que antes da passagem do elétron pela fenda ele é onda e partícula, mas que não se pode afirmar nada acerca de sua natureza (agnosticismo ontológico).

lícito passar de um desconhecimento epistemológico a um ontológico (não sei, logo não é) (BOHM, 2015).

3. A interpretação de Copenhagen (ortodoxa)

Vamos agora resumir aqui, por meio de postulados (tomados de forma simplificada), os resultados acima apresentados. Estes postulados foram desenvolvidos segundo a interpretação da Escola de Copenhagen (também chamada de ortodoxa), que teve como principais expoentes Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac e Max Born. Existem diversas outras interpretações, mas trataremos somente daquela que é a predominante entre os físicos modernos e a mais divulgada nos livros didáticos. Para uma densa discussão sobre esta interpretação e as demais, sugerimos a leitura de Pessoa Jr. (2003).

- *Postulado 1:* O estado de um sistema quântico em certo instante é determinado pela função de onda, $\Psi(x, t)$, correspondente a esse estado, seja ela um estado puro ou uma combinação deles.

Comentário: esse postulado abarca a nossa discussão acerca das soluções da equação de Schrödinger e da superposição de estados.

- *Postulado 2:* A toda grandeza física mensurável associa-se um operador hermitiano.
Comentário: basicamente, esse postulado nos diz que os resultados de medidas devem ser números reais (em contraponto aos complexos); o adjetivo “hermitiano”, extraído da matemática da álgebra linear, garante isso.
- *Postulado 3:* A evolução temporal da função de onda é regida pela equação de Schrödinger (eq. (5)).
Comentário: Para um instante t qualquer sabemos quem a função de onda do sistema.
- *Postulado 4:* Para cada medida realizada só é possível se obter um único valor, extraído de um dos *subestados* (chamados tecnicamente de autoestados) de uma superposição quântica.

Comentário: Esse postulado trata da superposição e dos valores possíveis de uma medida. Se um estado se encontra em uma superposição do tipo, por exemplo, então, ao se medir a energia, os únicos valores possíveis de se obter serão E_1 e E_2 .

- *Postulado 5:* Para um estado de superposição, não podemos conhecer de antemão o resultado da medição de um certo observável, mas somente a sua probabilidade $P_n = |c_n|^2$ de ser obtido.

Comentário: Por exemplo, no estado $\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}\Psi_1 + \frac{1}{2}\Psi_2 + \frac{1}{2}\Psi_3$ há a probabilidade $P_1 = (1/\sqrt{2})^2 = 1/2$ de a partícula encontrar-se no estado Ψ_1 ; $P_2 = 1/4$ de estar no estado Ψ_2 e $P_3 = 1/4$ de estar no estado Ψ_3 . Note que $1/2 + 1/4 + 1/4 = 1$, ou seja, a partícula tem de estar em algum desses estados.

- *Postulado 6:* Após a medida, o sistema colapsa para um dos subestados possíveis.

Comentário: Este postulado descreve o colapso da função de onda. Por exemplo, se ao se medir a energia de um sistema que esteja no estado acima obtemos E_2 , logo após a medição o sistema se encontrará, *necessariamente*, no estado Ψ_2 . Somente os subestados possíveis podem ser obtidos. No exemplo acima, somente os estados 1, 2 e 3.

O princípio de incerteza decorre das propriedades algébricas da matemática que fundamenta a teoria (álgebra linear e espaço de Hilbert), da definição de incerteza, da não comutabilidade¹⁶⁷ dos operadores associados à posição e à velocidade da partícula e das propriedades dos números complexos.

4. Conclusão da parte I

Como vimos nas páginas que antecederam, a interpretação ortodoxa se abstém de lidar com afirmações que vão além do que se pode atestar empiricamente, por essa razão é também qualificada de *positivista*. Além disso, discussões acerca do ser do objeto quântico perdem completamente o sentido; não importa o que seja o elétron ou o fóton (esvaziamento do ser), interessa apenas como podemos interpretá-los (por meio de modelos) a fim de que os cálculos concordem com os resultados experimentais, nesse sentido ela é *pragmática*.

Ainda, nessa interpretação, nos abstermos até mesmo de falar sobre observáveis físicos associados ao objeto quântico (como posição, velocidade, energia etc.) antes de efetuarmos uma medição. É que a superposição de estados não mede nossa ignorância sobre o estado em que de fato o sistema se encontra (ou seja, não é que ele esteja em algum dos autoestados possíveis e

¹⁶⁷ Não comutar significa que a ordem em que os observáveis são medidos importa. Por exemplo, medir posição e depois velocidade produz um resultado diferente de se medir primeiro a velocidade e depois a posição.

nós apenas o ignoramos), o que seria um problema meramente epistemológico, mas o sistema não está em estado algum; a medição é quem “gera” o seu estado final (ou seja, é um problema ontológico).

Não à toa, há filósofos que acusam os físicos modernos de estarem apenas “salvando as aparências” na física moderna, fazendo referência à astronomia do período medieval, em que não importava como o céu realmente seria, mas tão somente se nossos modelos matemáticos conseguiam fazer previsões acertadas. Porém, hoje, podemos ir ao espaço e ver “de fora”; na mecânica quântica, contudo, é impossível “ver de dentro”.

Tendo percorrido mais longamente do que desejávamos, esperamos a esta altura que o leitor esteja suficientemente embasado sobre mecânica quântica para que possamos dar o próximo passo – objetivo principal desse texto –, que é o de como conciliar tudo o que foi dito acima com a filosofia aristotélico-tomista. Como já dissemos, esse passo foi dado pelo físico norte-americano, Wolfgang Smith, (1930-2024).

Parte II – Uma interpretação clássica para a física quântica

5. Uma nova interpretação da mecânica quântica

Vejamos agora uma nova proposta de interpretação que dialoga com a filosofia clássica.

5.1 Introdução

De tudo o que foi dito acima, pode-se perceber quão revolucionária foi a formalização da teoria quântica, especialmente no que tange à compreensão que temos sobre o mundo físico ao nosso redor, forjada em grande parte pela física newtoniana. A bem da verdade, os físicos, desde Galileu¹⁶⁸, já vinham abrindo mão de muitos aspectos qualitativos e mesmo ontológicos dos entes físicos. As perguntas “o que é?” e “como é?” foram deixando de ser norteadoras de

¹⁶⁸ Em “O Ensaaiador” (1623), Galileu afirma: “Eu digo que, assim que concebo uma matéria ou substância corporal, sinto-me forçado a concebê-la (...) como grande ou pequena em relação a outras (...). Mas que ela deva ser branca ou vermelha, amarga ou doce, sonora ou muda, de odor agradável ou desagradável, disso não me sinto obrigado a fazer dela necessariamente acompanhada. Pelo contrário, penso que, se retirarmos os sentidos, todas essas qualidades desaparecem (...)”

novas teorias para serem substituídas por “qual o melhor modelo que se ajusta aos dados do experimento?”, ou seja, “como posso adequar as teorias às observações?”. Desse modo, os aspectos qualitativos foram substituídos quase que integralmente pelos quantitativos e a substância foi reduzida à categoria da quantidade¹⁶⁹. Em vez de falarmos das coisas, passamos a nos referir aos seus atributos quantificáveis e, portanto, mensuráveis. A mecânica quântica apenas tornou evidente um problema que já permeava a física há alguns séculos.

Curiosamente, esse esvaziamento ontológico dos objetos estudados pelos físicos foi sentido ainda pelos formuladores da MQ, os quais reagiram com frases que se tornaram emblemáticas na história da ciência:

I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. (FEYMANN, 1965, p. 129)

Na verdade ele não se comporta nem como partícula, nem como onda. Agora desistimos. Nós dizemos: “É como nenhum dos dois”. (FEYMANN, 2008, p. 1165)

[A onda de Bohr trata-se] de uma versão quantitativa do velho conceito de potência da filosofia aristotélica (...) um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade. (HEISENBERG, 1995, p. 31)

As funções de onda constituem uma versão quantitativa do antigo conceito de potência na filosofia aristotélica. (ibid., 1995, p. 36)

There is no quantum world. There is only an abstract quantum physical description (BOHR apud PETERSEN, 1963)

Tudo que sabemos da natureza está de acordo com a ideia de que o processo fundamental da natureza encontra-se fora do espaço-tempo, mas gera eventos que podem ser localizados no espaço-tempo. (STAPP, 2011)

I am convinced that He does not play dice. (EINSTEIN, 1971, p. 90)

O paradoxo quântico parece-nos o meio pelo qual a Natureza repudia uma filosofia espúria. (SMITH, 2017, p. 48)

Como se pode perceber, contrapondo-se a uma teoria elegante e altamente precisa, surgiu o problema filosófico sobre a que objetos físicos essa teoria se refere, não no sentido de seus nomes e propriedades, mas em que consistem esses objetos. Acerca disso, os físicos não ficaram indiferentes, mas, ao menos os que adotaram a posição positivista de Copenhague, se abstiveram de refletir sobre a questão, lançando mão da visão de que tais questões acerca da

¹⁶⁹ Notemos que na perspectiva aristotélica, ambas são categorias distintas do ser, complementares e irreduzíveis uma à outra.

natureza desses entes não fazem sentido e que o que importa é apenas aquilo que é passível de ser mensurado.¹⁷⁰

Vale salientar novamente que tal posicionamento, dentro da perspectiva da Escola de Copenhague, não é meramente epistemológica, mas ontológica mesmo: não é que não se possa conhecer certa propriedade quantitativa do ente físico devido a um grau de ignorância nosso, é que *ela não existe antes da medição, logo, não há nada para ser conhecido*.

5.2 A concepção de Smith

No início do atual século, o físico e filósofo norte-americano Wolfgang Smith escreveu uma série de trabalhos, entre artigos e livros, sobre a sua concepção interpretativa da mecânica quântica, esta baseada no que ele chama de “filosofia perene”, qual seja, a filosofia antiga de Aristóteles, atualizada por Tomás de Aquino na Idade Média, com o acréscimo de alguns toques platônicos. Em particular, seu pensamento sobre esse assunto se encontra distribuído em três das suas obras: *“The Wisdom of Ancient Cosmology: Contemporary Science in Light of Tradition”* (2003), *“The Quantum Enigma: Finding the Hidden Key”* (2005) e *“Physics: A Science in Quest of an Ontology”* (2024)¹⁷¹. Enfatizo, finalmente, antes de entrarmos no seu pensamento, que a filosofia de Smith é fortemente influenciada por simbolismos advindos de religiões orientais e também pelo cristianismo. Antes de ser demeritório, cremos que seu intuito é o de reunificar os ramos de conhecimento outrora unidos numa visão mais holística da realidade. Nessa conduta, contudo, parece-nos que por vezes “perde a mão”, criando interpretações de conhecimentos científicos muito bem estabelecidos tão ou mais exóticas do que as que pretende resolver na quântica. No entanto, dentro daquilo que nos for possível, tentaremos não adentrar nesses pontos, que em si são um campo profícuo de trabalho, e assim nos restringiremos aos aspectos físicos e filosóficos tão somente.

Há dois pontos de partida que fundamentam o seu trabalho: o primeiro diz respeito ao denominado “bifurcacionismo cartesiano”, assim apelidado pelo filósofo e matemático Alfred N. Whitehead, que trata da divisão nos entes promovida por René Descartes entre a *res cogitans* e *res extensae*. Nas palavras de Whitehead, o bifurcacionismo “é a bifurcação da natureza em

¹⁷⁰ Reforçamos aqui que estamos tratando tão somente da interpretação ortodoxa da teoria quântica. Desde seu surgimento, essa interpretação encontrou adversários como a ondulatória de Schrödinger e a dualista-realista de De Broglie e de Bohm.

¹⁷¹ Nas páginas que se seguem, para fim de citações diretas, utilizaremos as traduções para o português dessas obras, publicadas pela Vide Editorial. As referências encontram-se no final.

dois sistemas de realidade, os quais, na medida em que são reais, são reais em sentidos diferentes” (WHITEHEAD, 1994, p. 38 ss.). Para Descartes, de um modo bem resumido, somente aquilo que pode ser expresso em termos quantitativos, e portanto matemáticos (a *res extensae*), poderia estabelecer alguma verdade científica objetiva (como as medidas, por exemplo), uma vez que as qualidades (*res cogitans*), sendo fruto de nossas percepções, as quais eventualmente falham (e, para ele, seriam produto da mente), nos enganariam (e portanto, teriam natureza subjetiva, como a sensação de frio e de calor, ou a percepção de uma cor).

Segundo o próprio Descartes:

Pode-se facilmente conceber como o movimento de um corpo pode ser causado pelo de outro (...), mas somos totalmente incapazes de conceber como essas mesmas coisas [as extensas] poderiam produzir alguma coisa de natureza estranha a elas, como, por exemplo, aquelas formas substanciais e as qualidades reais que muitos filósofos supõem estarem presentes nos corpos (DESCARTES, 1997, p. 291).

Segundo o trecho acima, o movimento poderia ser facilmente compreendido em termos de propriedades mecânicas, mas as qualidades e a substancialidade não teriam como ser derivadas destas.

O segundo ponto de partida advém do próprio Heisenberg, aqui citado anteriormente. Este teria dado um bom diagnóstico acerca do problema filosófico existente na MQ, que consiste na observação de que nela há um *esvaziamento do ser* dos entes subatômicos. Os objetos físicos passam a não possuir mais forma substancial, ao menos antes da observação, estando a “meio caminho entre potência e realidade”. Ainda segundo Heisenberg:

Portanto, a transição do “possível” ao “real” ocorre durante o ato da observação. Se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo “ocorre” pode somente ser aplicado à observação e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas. Aquele termo diz respeito à componente física do ato de observação mas não à psíquica e poderemos dizer que a transição do “possível” ao “real” toma lugar tão logo a interação do objeto com o instrumento de medida (e, portanto, com o resto do mundo) tenha se realizado (HEISENBERG, 1995, p. 46)

Smith abraça essa tese de Heisenberg, dando-lhe, no entanto, uma outra roupagem, e com ela também, curiosamente, parte interpretação ortodoxa, aplicando-a a um outro domínio da realidade. Com isso, apesar de apresentar sua tese como realista, não devemos entender esse realismo no sentido de Bohm, Einstein, de Broglie e Schrödinger, mas em um sentido platônico: “Contudo, deve-se admitir que uma postura realista frente ao mundo microscópico somente pode ser sustentada em bases platônicas.” (SMITH, p. 116)

Por estar fortemente arraigada em noções filosóficas clássicas, especialmente na física e metafísica aristotélica-tomista, chamá-la-emos por esse adjetivo: interpretação *aristotélica-tomista* (IAT) da mecânica quântica.

5.3 Pressupostos implicitamente adotados na IAT¹⁷²

Apresentamos agora alguns postulados assumidos implícita e explicitamente na filosofia de Smith. Os cinco primeiros advêm da filosofia aristotélico-tomista:

1. *Princípio ontológico*: os objetos perceptíveis possuem ser e existência objetiva: logo, ele ou suas propriedades podem ser enquadradas em algumas das categorias aristotélicas: substância, quantidade, qualidade, relação, lugar, tempo, posição, posse, ação e paixão.
2. *Princípio epistemológico*: é possível conhecer algo sobre o mundo perceptível (corpóreo) e físico¹⁷³. Tal conhecimento passa em alguma etapa necessariamente pelos sentidos (ver postulado 5 abaixo).
3. *Princípios básicos da lógica clássica (terceiro excluído, identidade, não contradição)*: os princípios da lógica clássica continuam válidos, contudo, são aplicáveis somente aos entes corpóreos (a serem definidos adiante).
4. *Causalidades aristotélicas*: as quatro causas (material, formal, eficiente e final) exercem papel na física. Notem que a física moderna, especialmente a MQ, aparentemente abandonou as causas formais, finais e, em certas circunstâncias, até mesmo a eficiente, mantendo tão somente a material, que está relacionada às quantidades.
5. *Primazia dos sentidos*: este postulado apregoa que, ao contrário do que cria Descartes, os sentidos não só são importantes no desenvolvimento científico, como *são indispensáveis*, haja visto que qualquer conhecimento objetivo acerca de uma medida só pode ser conhecido por meio deles (eu preciso olhar o aparelho, ouvir o som do sensor etc.) Afirmar que os sentidos *sempre* nos enganam seria cair em um ceticismo radical incontornável, o qual inviabilizaria qualquer empreendimento científico. Dizer que os nossos sentidos *podem* se enganar não é o mesmo de dizer que *sempre* se enganam. Afirma-se aqui, portanto a primeira opção, negando-se a segunda.

Além destes, adicionemos mais dois, assumidos tacitamente pelos físicos:

¹⁷² Os nomes aqui atribuídos são de nossa autoria, tal como a esquematização desses princípios. Estes não aparecem de modo tão explícito nas obras citadas.

¹⁷³ Faremos a devida distinção mais abaixo.

6. *Realismo estrutural*: as relações (quantitativas/matemáticas) entre os objetos físicos são objetivas (existe uma relação verdadeira, ainda que possamos não saber qual é). Ou seja, nossas teorias físicas *dizem de fato algo sobre a realidade objetiva do mundo*.

7. *Realismo moderado*: os objetos postulados pelas teorias físicas existem de certa maneira, ainda que não sejam da forma exata que elas dizem que são (quando dizem). Por exemplo: diversas observações diferentes e independentes, tanto da física quanto da química, nos conduzem à existência dos átomos, constituídos por um núcleo e uma eletrosfera. Se de fato existem e são dessa maneira, não o sabemos, mas temos fortes indícios que ao menos estruturalmente se aproximam de algo assim.

Os próximos postulados são elaborações originais de Smith:

8. *Divisão bipartite da realidade em mundo corpóreo e físico*: os entes podem pertencer a dois domínios da realidade, mas não simultaneamente. O primeiro, o *corpóreo*, faz referência aos entes enquanto sujeitos à possibilidade de serem percebidos por nossos sentidos, de modo direto (por exemplo, enxergando-os diretamente com os olhos, ouvindo-os etc.) ou indireto (via medições experimentais, como correntes elétricas ou cintilamento de telas fluorescentes). Segundo Smith, o mundo corpóreo é “o somatório das coisas e eventos que podem ser percebidos diretamente por um ser humano no exercício de (...) seus sentidos.” (SMITH, 2019, p. 53)

Segue-se que coisas como peso e diâmetro, que são quantidades, em sentido estrito, não são percebidos por nós. O que percebemos é a leitura de uma balança e a marca de uma régua. Por essa razão temos necessidade destes instrumentos a fim de termos acesso àquelas quantidades. O instrumento, desse modo, pelo ato da medição, traduz “as quantidades mensuráveis para o estado perceptível de um objeto corpóreo” [o instrumento, no caso] (*ibid.*, p. 59).

O segundo domínio, o *físico*, faz referência aos entes enquanto possam ser submetidos ao escrutínio dos físicos através das técnicas que lhes são próprias, como por aparelhos de medição e modelos, e é sobre estes que tratam as teorias físicas.¹⁷⁴ Segundo Smith, o universo físico é “o âmbito das coisas em princípio cognoscíveis por esses meios [os dos físicos] em particular.” (*ibid.*, p. 57)

¹⁷⁴ Notemos que o adjetivo “físico” aqui é utilizado por Smith de forma diferente da convencional. Usualmente, nós o utilizamos como sinônimo de algo existente no mundo, percebido diretamente ou não pelos sentidos. Assim, tanto uma vaca seria um ente físico (pois possui matéria e energia) quanto um elétron. Smith separa essas realidades.

Quando, por exemplo, tratamos da trajetória de uma bola de futebol após um chute, tratamos do *objeto físico* associado à bola (corpórea), ou seja, uma esfera de raio R , massa m , densidade ρ etc., que está, por meio de suas propriedades quantitativas abstraídas do ente original, associada ao objeto *bola de futebol* que vemos se mover. Nesse domínio físico, portanto, prevalece a categoria das quantidades, enquanto no corpóreo é a qualidade que predomina¹⁷⁵, e, portanto, esses objetos “são, por sua própria natureza, invisíveis, intangíveis, inaudíveis, assim como destituídos de sabor e de aroma”¹⁷⁶ (*ibid.*, p. 63).

No domínio físico há também uma divisão importante, aquela entre os entes *subcorpóreos* e *transcorpóreos*. Essa distinção é central para toda a interpretação de Smith. Os entes subcorpóreos (SX, como os chama) são aqueles que possuem um correspondente X no âmbito corpóreo. No exemplo acima da bola de futebol, a esfera a ela relacionada seria um ente subcorpóreo, uma vez que a esta esfera SX pode-se associar um ente X (bola), ou seja, é sempre possível *reificar* um objeto subcorpóreo. Agora vejamos que campos, átomos, fótons, elétrons etc., tais como descritos pela MQ, não possuem um correspondente X; são, portanto, entes pertencentes eminentemente à dimensão física do mundo – são os transcorpóreos. Para estes, ainda que usemos imagens para ilustrá-los em algum ponto dos estudos, devemos logo abandoná-las por serem em seu todo ineficazes para descrever os objetos que pretendem representar.

No âmbito do universo físico essa dicotomia carece de sentido, pois ambos os objetos físicos, corpóreos e transcorpóreos, podem ser investigados pelos mesmos métodos da ciência física. A diferença, contudo, é de extrema importância a fim de se compreender os fenômenos quânticos, pois na divisão da realidade nesses dois domínios estaria a chave da sua compreensão filosófica.

9. *Causalidade vertical*: além das quatro causas aristotélicas tradicionais, que se dão no tempo e nas quais a causa antecede o efeito (e por isso é por ele denominada *horizontal*, no sentido da flecha do tempo), existe uma causalidade instantânea, a *vertical*. Esta é responsável por tornar um ente físico, que enquanto tal não pode ser percebido devido à sua própria natureza potencial, passível de sê-lo. No ato da medição, então, ocorre o que Smith chama de *causação vertical*, a partir da qual o ente físico torna-se passível de ser, de algum modo, percebido no nível corpóreo,

¹⁷⁵ Percebamos que distinguimos usualmente os seres no mundo corpóreo por suas qualidades, não por suas quantidades. Assim diferenciamos, por exemplo, uma bola de futebol de uma de basquete, as pessoas entre si, os animais etc.

¹⁷⁶ Notem aqui a semelhança de tais objetos com os átomos de Demócrito e de Galileu, ou mesmo com a *res extensae* cartesiana.

de forma indireta, através do resultado da medida expresso no equipamento de medida – a *presentificação*. Desse modo, o objeto físico transita de um estado de pura potência ao ato. Nesse processo ocorre a *especificação* desse objeto, ou seja, a determinação de um conjunto de atributos observáveis. A diferença entre os entes subcorpóreos e transcorpóreos se faz desse modo evidente, pois os primeiros possuem um correlato X, pertencente ao nível corpóreo, para os quais todos os atributos passíveis de serem determinados podem sê-lo; já para os segundos, não há referente que “regeria” tais atributos, gerando-se assim a indeterminação de alguns destes, mantendo-os em estado de pura potência.

É por meio da medição e da consequente causação vertical que os atributos emergem, sendo atualizados e dando ao objeto em questão o status de *coisa*. Alguns desses caracterizam de modo unívoco o objeto em questão, como ocorre por exemplo com a carga, massa e *spin* do elétron, e são atributos intrínsecos; outros são dinâmicos, e é sobre estes que atuam a superposição quântica e o princípio de incerteza, tais como posição e momento. Desse modo, tal qual ocorre na interpretação ortodoxa, não se pode atribuir esses segundos atributos às partículas quânticas pelo simples fato de ela não os ter, contudo há uma diferença fundamental: na interpretação ortodoxa essa interpretação se dá no plano corpóreo. pois se confunde ambos os planos; na IAT ela se dá no físico, onde reinam as potências. Vemos, portanto, que IAT tem caráter profundamente metafísico, no sentido aristotélico do termo.

5.4 A Interpretação Aristotélica-Tomista

Como podemos coadunar os fenômenos quânticos à IAT? Em parte, a resposta a essa questão já nos foi dada na seção anterior. Vamos agora desenvolvê-la mais detalhadamente.

Para Smith, a realidade se divide em duas dimensões (domínios ou universos) do ser: o domínio dos entes corpóreos, que *são*, ou seja, estão em ato, e o dos físicos, que *quase-são, ou seja*, estão em potência. Veja que utilizamos aqui o prefixo “quase”, uma vez que no domínio físico as partículas não são completamente desprovidas de ser, mas o tem em menor grau comparativamente ao domínio superior, o corpóreo. A total ausência de ser se daria na matéria-prima pura, o que seria uma abstração total da forma. Podemos, portanto, imaginar uma estratificação da realidade em camadas, de baixo para cima, do menor grau existencial ao maior. Na base estaria a matéria-prima, na camada intermediária os entes físicos e acima desta os entes corpóreos.

No âmbito da matéria-prima, os supostos “seres” seriam desprovidos de forma, ou seja, seriam *não-seres*¹⁷⁷. Na camada física, por outro lado, os objetos seriam “um tipo de ente físico a meio caminho entre potência e realidade”, nas palavras de Heisenberg, o que quer dizer que estariam em potência ao ser, mas não a qualquer ser indeterminado, mas àqueles cujas leis da natureza (no caso, da mecânica quântica) possibilitariam. Essa indeterminação também não é irrestrita; como falamos antes, sabemos muito bem que atributos *quantitativos* caracterizam um elétron (massa, carga e spin) e, desse modo, os atributos potenciais seriam apenas os dinâmicos, e só estes estariam passíveis à indeterminação e à superposição quântica¹⁷⁸.

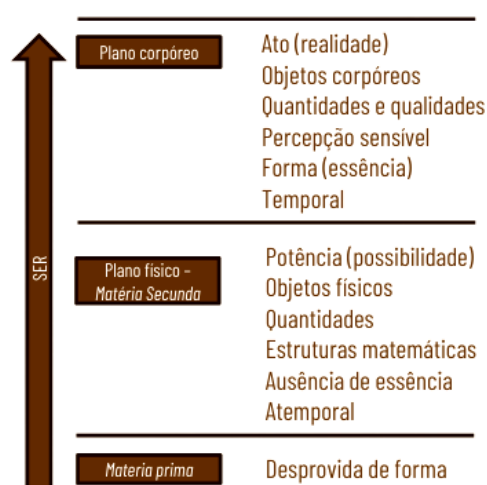


Figura 2: Representação esquemática dos domínios da realidade com seus respectivos atributos. (Fonte: próprio autor)

Uma ilustração metafórica disso pode ser dada a partir do lançamento de um dado: seus atributos (faces). antes de repousar sobre uma superfície, encontram-se em um estado de “superposição” de “1”, “2”, ... e “6”. Fora esses estados, nenhum outro é possível. O mundo físico no âmbito dos entes transcorpóreos (quânticos) seria como o dado ao ar e o seu repouso seria o ato da medida, onde se é selecionado um dos estados possíveis (face voltada para cima)¹⁷⁹. É, portanto, nessa camada da realidade que as entidades subatômicas não possuem posição, velocidade, energia etc. definidas. Não possuem porque tais atributos não são de fato, pois não atualizaram a sua potencialidade. O ato da medição, portanto, – a causalidade vertical

¹⁷⁷ O que nos leva, obviamente, a uma contradição lógica. Portanto a matéria-prima, enquanto tal, não tem subsistência ontológica.

¹⁷⁸ Não entraremos aqui na discussão sobre reações de aniquilação matéria-antimatéria ou em quaisquer outras que possibilitem a transição de objetos físicos de uns a outros.

¹⁷⁹ A analogia, evidentemente, é apenas parcial, pois no caso do dado clássico assume-se normalmente que o resultado já está fisicamente determinado antes do repouso, ainda que desconhecido por nós. Na superposição quântica, contudo, não se trata meramente de ignorância epistemológica acerca de um estado previamente definido.

– faz surgir esses atributos da partícula, elevando-os da condição de potência para a de ato, do quase-ser ao ser.

É na dimensão física também que predominam as quantidades, qual sejam, os atributos mensuráveis dos entes ou as propriedades quantificáveis. Por essas propriedades é que conseguimos discernir entre elétrons, prótons, fótons, pósitrons e os demais entes subatômicos. É nesse estrato da realidade que se aplicam as leis quantitativas da natureza (estruturas matemáticas), que são inexoravelmente seguidas por seus entes, independentemente de quais sejam conhecidas por nós ou não. São essas leis que são perseguidas por nossas teorias e passíveis de serem testadas via experimentação.

Nesse sentido, a função de onda $\Psi(x, t)$ e o princípio quântico de superposição descrevem o estado de um ente ou sistema físico em qualquer instante t enquanto este “habita” a dimensão física. Nesse estado, não há qualquer contradição lógica (clássica) em se afirmar que o estado do ente é regido por uma superposição ondulatória tal como $\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}\Psi_1 + \frac{1}{2}\Psi_2 + \frac{1}{2}\Psi_3$, por exemplo. Uma vez que na presente interpretação, a função de onda nada mais do que nos fornece as possibilidades que o ente pode assumir ao adentrar no domínio corpóreo. Não se trata, portanto, de o objeto físico ser onda e partícula, mas, apenas que a sua suposta natureza ondulatória atua regendo as possibilidades de determinação dos seus atributos dinâmicos.

Ao efetuarmos uma medição, a causação vertical age sobre o ente de modo a trazer à tona um dos atributos possíveis, fenômeno este que chamamos anteriormente de colapso da função de onda. Nessa etapa, podemos identificar o referido objeto como, supostamente, uma partícula (ao vermos que algo bateu na tela fluorescente gerando nela um brilho localizado) ou uma onda (pelo fenômeno da interferência), mas não devemos entender esses termos dentro de um realismo ingênuo em que partículas seriam como bolinhas de massa m e ondas seriam oscilações de vetores no espaço. Esses objetos (partículas e ondas) não são perceptíveis diretamente (enquanto tais) e, com isso, não pertencem ao domínio corpóreo e não podem ser reificados impunemente; trata-se de objetos físicos que presentificam seus atributos através de um processo de medição, cujo resultado, este sim, pode ser percebido e interpretado. Os paradoxos quânticos surgem justamente quando confundimos ambos os domínios. Dessa maneira, essa interpretação se coaduna aos postulados 1 a 5 da MQ descritos acima (seção 3), preservando-os inclusive; contudo há uma importante diferença: os postulados são aplicáveis apenas ao domínio físico-transcorpóreo.

A IAT nos ajuda ainda a responder à seguinte questão: quando os fenômenos quânticos deixam de sê-lo? Na visão de Heisenberg, a linha demarcatória seria a de transição entre o micro e o macro. Mas em que consiste o macro? A partir de quantos átomos ou moléculas aglomeradas ocorre essa transição? Essas perguntas são difíceis de serem respondidas e experimentos recentes mostraram que mesmo com macromoléculas ainda é possível se verificar fenômenos quânticos¹⁸⁰. Na IAT esse problema não existe, uma vez que não é preciso recorrer ao número de átomos de um corpo; a passagem do domínio quântico ao clássico se dá no instante da passagem do físico ao corpóreo, ou seja, pela ação da causalidade vertical através de um processo de medição, no qual a entidade física é presentificada tornando-se passível de ser percebida. Os aglomerados poucos importam, o que importa é se estes estão susceptíveis ao nosso escrutínio ou não. Tenha-se em mente aqui que não se trata de uma tomada de consciência por parte do cientista, mas da *possibilidade* de se tomar conhecimento em qualquer momento. Por exemplo, o cientista poderá programar seus aparelhos para efetuarem certa medida às, digamos, 00:00 h de um dia qualquer, quando ele, confortavelmente, estará em sua casa dormindo. No entanto, a medida será efetuada e já terá dado um resultado objetivo, que ele ou qualquer outra pessoa poderá consultar a qualquer momento. É o ato da medição que provoca a transição físico→corpóreo, não a consciência humana.

O famoso paradoxo do gato de Schrödinger também perde seu status de paradoxo com a IAT. Esse paradoxo teria sido proposto pelo físico cujo paradoxo leva o nome devido ao seu descontentamento com a interpretação dualista antirrealista de Copenhague (IC). Nele, um gato estaria numa caixa, onde haveria também um sistema contendo urânio radioativo acoplado a um frasco de gás venenoso. Se o urânio decair, o gás é liberado e o gato morre; se não, o gato se mantém vivo. Antes de qualquer medida sobre o urânio, este estaria na superposição *decaído–não-decaído*. Uma maneira de se saber o estado do urânio (*decaído ou não-decaído*) seria pelo estado a ele acoplado do gato (*vivo ou morto*). Uma vez que antes de se abrir a caixa não seria possível saber o estado do gato (e, portanto, o do urânio), este (o gato) estaria em uma superposição *vivo-morto*, uma vez que não haveria sido feita qualquer medida sobre o urânio, estando este na superposição *decaído–não-decaído*. Na IAT não importa se se abra ou não a caixa, o estado de superposição ocorrerá enquanto não houver qualquer forma de identificá-lo. Dessa maneira, no ato do decaimento o veneno será liberado, informando, portanto, o estado *decaído* para o urânio. Isso quer dizer que até que esse evento ocorra, o gato permanecerá vivo,

¹⁸⁰ Têm-se demonstrado fenômenos quânticos em corpos compostos por até 2000 átomos <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary/>>.

tomemos conhecimento disso ou não, e não há qualquer paradoxo – a superposição de estados vale, então, *apenas* para o domínio quântico.

Um forte paradigma que rege o mundo macroscópico e nossas relações com entes a ele pertencentes é a distinguibilidade dos seres. Cada ser nesse nível da realidade pode-se dizer único e distinguível de outros, por atributos qualitativos e/ou quantitativos. Contudo, na MQ “não existem tigres de três pernas”, ou seja, podemos classificar entes físicos nesse domínio por alguns atributos próprios tais como massa, carga, spin etc., mas entre indivíduos da mesma classe (elétrons, prótons, pósitrons etc.) não há distinguibilidade possível; qualquer mudança em um atributo (a perda de uma “perna”) torna-lo-á um novo ente (não mais um “tigre”).

Definamos um indivíduo pelas seguintes afirmações (KRAUSE, 2024, p. 123)¹⁸¹: um indivíduo é uma entidade qualquer que:

- 1) seja de algum tipo (pessoa, gato, relógio etc.) e
- 2) possa ser reidentificável como tal em outros contextos.

Os entes quânticos carecem do segundo aspecto. Se um átomo de hélio perde um dos elétrons e torna a ganhar um novo, não podemos saber se este “novo” é o original perdido ou outro; aliás, tal questão é totalmente indiferente para a física. Importante frisar aqui que, na visão ortodoxa da quântica, não se trata apenas de uma questão epistemológica, mas ontológica mesmo. Esses elétrons sequer podem ser identificados por suas posições, pois se temos dois elétrons confinados em uma “caixa quântica”, a função de onda deles será uma função de onda que permutará todas as posições possíveis para cada elétron. Para um exemplo simples, imaginemos que dois elétrons, *A* e *B*, só podem ocupar duas posições distintas no espaço, x_1 e x_2 . A função de onda que representa essa situação é dada por¹⁸²

$$\psi_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_A(x_1)\psi_B(x_2) - \frac{1}{\sqrt{2}}\psi_A(x_2)\psi_B(x_1),$$

que ilustra que as partículas *A* e *B*, antes de qualquer medição, estariam *como que* em ambas as posições x_1 e x_2 simultaneamente. Logo, a probabilidade de que o elétron *A* esteja na posição x_1 e de que o *B* na posição x_2 é $\frac{1}{2}$. Do mesmo modo é a probabilidade da inversão das posições. Antes da observação, portanto, não podemos indicar qual a posição dos elétrons. E mais, de modo mais rigoroso, sequer podemos dizer quem é o *A* e quem é o *B* (não é possível rotulá-los sequer pela posição). Portanto, são completamente indistinguíveis.

¹⁸¹ O livro *Introdução à Filosofia e à Lógica da Física Quântica*, de Décio Krause, traz uma extensa discussão sobre individualidade, identidade e individuação.

¹⁸² Pensando-se nos modelos de Bohr para o átomo de hélio, tal estado poderia ser tal que os seus dois elétrons pudessem ocupar tão somente dois níveis de energia (ou camadas), como as $K(x_1)$ e $L(x_2)$, por exemplo.

Vejamos que a característica acima se coaduna com a visão do mundo físico enquanto um quase-ser ou ser em potência. Ficou claro de nossa exposição acima que os objetos pertencentes ao domínio quântico (e, portanto, físico) quase não apresentam (se é que apresentam) propriedades qualitativas; mas são estas, via de regra, que usamos para distinguir os objetos do domínio corpóreo. Eu sei que *esta bola é a minha bola* por aspectos que conheço da minha experiência sensível com ela (uma marca deixada nela, por exemplo), não devido ao seu peso, volume ou qualquer outra propriedade quantitativa. No domínio físico, contudo, esta individualidade desaparece, não somente no domínio quântica, mas também fora dele, no dito clássico. Quando estudo o movimento de uma bola de futebol, *não importa se esta é a minha bola ou qualquer outra*, importam tão somente suas características mensuráveis, tais como massa, diâmetro etc. Ou seja, *qualquer bola* que tenha essas propriedades quantitativas obedecerá ao resultado dos cálculos da trajetória, determinada pelas leis da natureza. Consequentemente, qualquer ente perde sua identidade ao descer para a camada física da realidade. Vemos, portanto, que o esvaziamento do ser é, antes de uma regra aplicável apenas aos objetos subatômicos, aos quais se aplica as leis da física quântica, uma característica dos objetos em geral. Mas há uma diferença fundamental aqui: para estes últimos (os objetos sensíveis em geral), a correlação entre ser corpóreo (X) e ser subcorpóreo (SX) se dá de cima para baixo; primeiro eu vejo uma bola, depois dela abstraio os aspectos matematizáveis, transformando-a em uma esfera matemática. Nos primeiros, no entanto (os quânticos), o processo se dá em sentido inverso, de baixo para cima. Os atributos dos entes quânticos nascem de medidas experimentais, mediadas por teorias físicas, não de abstrações de algo sensível. Assim, quando tentamos criar uma imagem dos entes quânticos, como quando pensamos no elétron como uma bolinha ou em um átomo como um núcleo formado de prótons e nêutrons ao redor dos qual elétrons giram, falhamos desastrosamente¹⁸³. Ou seja, não há um objeto corpóreo associado a esses entes (por isso são classificados como transcorpóreos – TC).

Na IAT isso não é um problema, uma vez que o ser da entidade quântica é apenas uma potência passiva, não há nenhum problema em não lhe atribuir qualquer posição ou, como alguns costumam falar, atribuir-lhes todas as posições possíveis. No caso dos entes SX pertencentes ao domínio físico, tal não pode ser feito pois o comportamento de SX é regido pelo seu correlato X, que nos é diretamente sensível. Para os objetos transcorpóreos, no entanto,

¹⁸³ Ainda que em algum estágio do desenvolvimento teórico essas imagens nos sejam úteis, devemos abandoná-las o tanto quanto possível por não se coadunarem aos fatos experimentais, como já o demonstramos mais acima.

não há um X ao qual estejam vinculados, gozando, pois, de maior liberdade de possibilidades: maior potência e menor ato.

Por fim, mesmo o exótico fenômeno do emaranhamento quântico, no qual partículas ditas emaranhadas comunicam-se instantaneamente uma com a outra, diminui sua estranheza se admitirmos que esta comunicação entre elas se dá apenas no âmbito do domínio físico, onde o espaço e o tempo agem de forma diferenciada daquela que ocorre no domínio corpóreo. Sabemos da teoria quântica que ao se realizar uma medição qualquer em uma dessas partículas (por exemplo, da direção de polarização de um fóton), o emaranhamento é quebrado. A explicação dada pela IAT é simples: com a medição aquele atributo passou ao domínio corpóreo, onde prevalece a causalidade horizontal (portanto, temporal), e nenhuma comunicação instantânea é mais permitida.

6. Conclusão

Na primeira parte deste presente artigo discurremos sobre alguns principais aspectos teóricos da mecânica quântica a fim de fornecer ao leitor algum suporte que o fizesse capaz de compreender como essa teoria vai de contra à física newtoniana (dita clássica) e teima em desafiar nossas noções lógicas clássicas mais arraigadas, proporcionando-nos certas estranhezas ao lidarmos com ela. Tais questões foram, e ainda são, motivadoras de muitos debates entre físicos e filósofos. Temos a esperança de termos conseguido algum êxito nesse objetivo.

Na segunda parte, apresentamos, com uma estruturação nossa, a interpretação proposta pelo físico W. Smith, a qual se baseia em conceitos advindos da física/metafísica aristotélico-tomista (razão pela qual a apelidamos de IAT). Vimos que ela aceita plenamente os fenômenos quânticos, sem precisar realizar qualquer modificação na teoria quântica (como faz, por exemplo, a teoria realista de D. Bohm – 2015). Na IAT, os fenômenos que nos parecem exóticos se restringem ao domínio que é por Smith denominado de *físico*, no qual reinam os entes subcorpóreos (SC) e transcorpóreos (TC) (sendo os entes quânticos pertencentes à segunda categoria), diferindo-se uns dos outros pela existência de um correlato no mundo sensível (ou seja, corpóreo): os SC o possuem enquanto os TC, não.

Com isso podemos concluir que toda a estranheza presente na MQ deve-se atribuir, segundo a IAT, ao fato de confundirmos os entes físicos com os corpóreos. De fato, na física clássica essa distinção passa despercebida pela abstração imediata que fazemos dos aspectos

quantitativos dos objetos que se apresentam aos nossos sentidos e, conseqüentemente, não notamos que ao calcularmos a trajetória de uma bola de futebol não estamos mais lidando diretamente com *esta bola*, mas com uma abstração matemática dela, a qual preserva aspectos imediatamente relacionáveis com o objeto original. Desse modo, tais estranhezas não aparecem, uma vez que a bola sensível deve seguir exatamente o movimento da matemática.

No âmbito dos entes subatômicos os aspectos exóticos aparecem pois queremos forçar que, *inicialmente*, tal como ocorre com a bola acima, estes *sejam*, quer dizer, tenham uma natureza e atributos previamente determinados antes de qualquer observação (este era o realismo de Einstein, De Broglie e Schrödinger). Mas, como esperamos ter deixado claro acima, isso sequer faz sentido dentro da IAT, uma vez que a corporeidade decorre da observação¹⁸⁴. Logo, essas entidades não podem ser interpretadas como partículas ou ondas ou qualquer outra coisa antes de qualquer medição efetuada sobre elas. Se pudéssemos resumir a um fato os supostos problemas de natureza filosófica surgidos na teoria quântica poderíamos afirmar que estes aparecem da confusão entre ente físico e corpóreo. Os cientistas pensam lidar com entes corpóreos quando, na verdade, lidam apenas com seus correlatos pertencentes ao domínio físico.

Sabemos que dentro do âmbito da filosofia dificilmente pode haver argumentos irrefutáveis, mas também sabemos que uma concepção filosófica pode se mostrar mais adequada para descrever certa realidade do que outras. Neste artigo, além de apresentar a IAT, creio que não tenha passado despercebida ao leitor certa inclinação favorável a essa interpretação. Se assim ocorreu, não julgue o leitor estar enganado; de fato, cremos que ela se adéqua, sem grande esforço, à realidade imediata que nos é apresentada, preservando os princípios lógicos clássicos que nos norteiam desde a mais tenra consciência e as concepções físicas abstraídas da experiência comum, ao mesmo tempo em que abarca os fenômenos da mecânica quântica de uma forma que direciona as suas peculiaridades a um domínio bem específico, o físico.

Por fim, há pontos ainda a serem debatidos e elucidados pela IAT, dentro da MQ e mesmo da física clássica¹⁸⁵, mas cremos que, independentemente destes, W. Smith nos deixou uma grande contribuição que precisa ser conhecida, debatida e aprofundada.

¹⁸⁴ Repitamos uma última vez, tal observação pode ser direta (por uma tela cintilante) ou por um sensor qualquer, a consciência aqui não exerce qualquer papel fundamental. O que importa é que sejamos capazes em algum momento de saber que uma medida foi efetuada e qual o seu resultado.

¹⁸⁵ Em que consiste o status ontológico do domínio físico (há um certo platonismo aqui)? Ou, como se dá a relação entre os objetos X e SX?

Referências bibliográficas

- BOHM, D. *Causalidade e acaso na física moderna*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2015.
- BOHR, N. *apud* PETERSEN, A. *The philosophy of Niels Bohr*. *Bulletin of the Atomic Scientists*, Chicago, v. 19, n. 7, p. 8–14, set. 1963.
- DESCARTES, R. *Princípios da filosofia*. Tradução de João Gama. Lisboa: Edições 70, 1997. Parte IV, §198, p. 291.
- EINSTEIN, A. *On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light*. *Annalen der Physik*, Leipzig, v. 17, p. 132–148, 1905.
- EINSTEIN, A. *Carta a Max Born, 4 dez. 1926*. In: BORN, Max; EINSTEIN, Albert. *The Born-Einstein letters: correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955*. New York: Walker and Company, 1971.
- EINSTEIN, A. *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*. Tradução de Oliver F. Piattella. *Cadernos de Astronomia*, Vitória, v. 1, n. 1, p. 157–176, 2020.
- FEYNMAN, Richard P. *The character of physical law*. Cambridge, MA: MIT Press, 1967. cap. 6, p. 129.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de física de Feynman: edição definitiva* [recurso eletrônico]. Tradução de Antônio José Roque da Silva e Sylvio Roberto Accioly Canuto. Porto Alegre: Bookman, 2008. p. 1165.
- GALILEI, G. *O ensaiador*. Tradução de Helda Barraco. São Paulo: Nova Cultural, 1991. p. 21–22.
- HEISENBERG, W. *Física e filosofia*. 3. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1995.
- KRAUSE, D. *Introdução à filosofia e à lógica da física quântica: com ênfase nas questões da identidade e individualidade das entidades quânticas*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2024.
- MARTINS, R. A.; ROSA, P. S. *História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie*. 1. ed. São Paulo: LF Editorial, 2014.
- OH, J. Y.; SON, Y. A.; HAN, S. K. *Philosophical strategies for nature of science based on worldviews: The quantum interference of single electron*. *Heliyon*, v. 9, n. 9, e19331, 2023.
- PESSOA JR., O. *Conceitos de física quântica*. v. 1. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- PRÊMIO Nobel de Física 2025. *NobelPrize.org*. Divulgação do Prêmio Nobel 2026. Disponível em: NobelPrize.org. Acesso em: 14 maio 2026.

- SCHRÖDINGER, E. *An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules*. *Physical Review*, New York, v. 28, n. 6, p. 1049–1070, 1926. DOI: 10.1103/PhysRev.28.1049.
- SMITH, W. *O enigma quântico*. 3. ed. Campinas: Vide Editorial, 2019.
- SMITH, W. *A sabedoria da antiga cosmologia*. Tradução de Adriel Teixeira, Bruno Geraidine e Cristiano Gomes. Campinas, SP: Vide Editorial, 2017.
- SMITH, W. *Física: uma ciência em busca de uma ontologia*. Campinas: Vide Editorial, 2024.
- SUTTINI, et al. *Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard, Arthur Haas e J. J. Thomson*.
- STAPP, H. P. *Mente, matéria e mecânica quântica*. Tradução de Dante Augusto Galeffi. Salvador: EDUFBA, 2011.
- THOMSON, W. (Lord Kelvin). *Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, série 6, v. 2, n. 7, p. 1–40, jul. 1901.
- WHITEHEAD, A. N. *O conceito de natureza*. São Paulo: Martins Fontes, 1994.