



# Ontologia quântica emergentista e o problema do colapso da função de onda<sup>1</sup>

## Quantum emergentist ontology and the collapse of the wave function

DOI: 10.20873-rpvn9v1-25

Vinicius Carvalho da Silva

E-mail: [viniciusfilo@gmail.com](mailto:viniciusfilo@gmail.com)

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1061-2727>

### Resumo

Em *Para uma interpretação emergentista do problema da medição; uma hipótese de trabalho*, o filósofo da física português, João Luis Cordovil realiza com elegante simplicidade e didatismo uma tarefa que está longe de ser das mais fáceis, a saber, a de introduzir o leitor ao estado da arte de um campo de pesquisa de alta expertise, e o de contribuir para a literatura especializada acrescentando algo de novo ao debate, fazendo, portanto, avançar em alguma medida as fronteiras do conhecimento. A questão apresentada e enfrentada por Cordovil, é, como o próprio autor adianta já no resumo do trabalho, o grande, ou talvez o “único problema” da Mecânica Quântica: o problema da medição. Nesse texto, analisamos a proposta de uma ontologia emergentista como hipótese para solução do problema da medição em MQ.

### Palavras-chave

Ontologia quântica, Função de Onda, Equação de Schrödinger, Problema da Medição, Interpretações da Mecânica Quântica.

### Abstract

In *Para uma interpretação emergentista do problema da medição; uma hipótese de trabalho*, the Portuguese philosopher of physics, João Luis Cordovil accomplishes with elegant simplicity and didacticism a task that is far from being the easiest, namely, to introduce the reader to the state of the art of a field of research of high

---

<sup>1</sup> A versão do artigo ora apresentado, trata-se de um aprofundamento e ampliação da mesma discussão publicada como “Ontologia Quântica: A Interpretação Emergentista e a Hipótese de Cordovil”. Em *Pré-impressões SciELO*. <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.6285>.

Disponível em: <<preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/6285/version/6658>>.

expertise, and to contribute to the specialized literature by adding something new to the debate, thus advancing in some measure the frontiers of knowledge. The question presented and faced by Cordovil, is, as the author himself states in the abstract of the work, the great, or perhaps the "only problem" of Quantum Mechanics: the problem of measurement. In this text, we analyze the proposal of an emergentist ontology as a hypothesis to solve the measurement problem in QM.

### Keywords

Quantum Ontology, Wave Function, Schrödinger Equation, Measurement Problem, Interpretations of Quantum Mechanics.

## Edificando os fundamentos da mecânica quântica: Entre matrizes e ondas

Em 1925 o físico filósofo alemão Werner Heisenberg publicou o artigo "Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen" na *Zeitschrift für Physik*, em que a teoria quântica é desenvolvida por meio de um formalismo matemático matricial que representa a evolução temporal de sistemas físicos a partir de observáveis bem definidos.

A mecânica de Heisenberg foi considerada por muitos como matemática pura, excessivamente abstrata e desprovida de conteúdo físico<sup>2</sup>. O trabalho de Heisenberg (1925)<sup>3</sup> – em que não há tratamento ondulatório das entidades quânticas, e, portanto, não há a noção de função de onda<sup>4</sup> – expressa a tentativa de Heisenberg de construir uma mecânica quântica

---

<sup>2</sup> Conforme Tomáš Mančal "In his famous paper, "Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen", often referred to only as "Umdeutung", Werner Heisenberg formulated the first version of modern quantum mechanics. This formulation later merged with the equivalent, but formally different formulation of Erwin Schrödinger, developed around the same time. Historically, the paper was quickly superseded by a mathematically much more concise matrix mechanics of Born and Jordan (and eventually Heisenberg himself), and it might therefore seem of a historical value only. Quantum mechanics as we know and teach it today is barely recognizable in the "Umdeutung paper", and Heisenberg's train of thoughts was deemed incomprehensible even by some of the most accomplished theoretical physicists of our days" (MANCAL. 2021, p. 1).

<sup>3</sup> Sobre possíveis relações entre a filosofia da física de Heisenberg e o objeto desse artigo, que é o emergentismo na física, cremos que pesquisas ulteriores devem abarcar o estudo de "A ordenação da realidade", o manuscrito de 1942 de Heisenberg, em que o físico filósofo, dialogando com Goethe em sua teoria das cores trata do problema da estratificação da realidade.

<sup>4</sup> De acordo com José Fernando Perez em "Usando a representação de Heisenberg": "(...) na formulação originalmente utilizada por Heisenberg para introduzir a Mecânica Quântica, a noção de estado quântico de um sistema, representado por sua função de onda, era inexistente, sendo a evolução temporal do sistema físico descrita exclusivamente através da dependência temporal dos observáveis *posição* e *momento*, que eram representados por matrizes" (PEREZ. 1995, p. 123).

fundada em observáveis “representadas por matrizes” (PEREZ, 1995, p. 123). Conforme Heisenberg:

A partir desse estado de coisas, parece mais aconselhável desistir completamente de qualquer esperança de uma observação das quantidades não observáveis (como a posição e o período orbital do elétron) e, portanto, ao mesmo tempo, conceder que a concordância parcial entre as regras quânticas declaradas e o experimento é mais ou menos coincidente e tentar construir uma mecânica quântica teórica que seria análoga à mecânica clássica, na qual apenas as relações entre as quantidades observáveis estariam presentes [tradução nossa] (HEISENBERG, 1925, p. 879-880).<sup>5</sup>

Em 1926 Schrödinger publicou o artigo “Quantisierung als Eigenwertproblem Erste Mitteilung”<sup>6</sup> em quatro partes na *Annalen der Physik*, apresentando sua mecânica ondulatória, que o autor demonstraria ser matematicamente equivalente ao trabalho de Heisenberg com matrizes, com a vantagem de ser, na visão de alguns, mais intuitiva, com “claro” conteúdo físico. Estavam lançadas as bases da mecânica quântica, que daria azo a uma vasta gama de formalismos bem como de interpretações, que, por sua vez, teriam ontologias distintas, e diversas consequências epistemológicas. Nessa ocasião nos concentraremos na formulação ondulatória de Schrödinger.

### **Equação de Schrödinger e Colapso de Função de Onda**

Na formulação ondulatória original da mecânica quântica, para cada partícula quântica associa-se uma onda, ou, em sentido mais forte a evolução temporal de cada partícula quântica é tratada ondulatoriamente e seu comportamento é dado pela equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(t, x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(t, x) + V(x)\Psi(t, x) \quad [7]$$

<sup>5</sup> Tradução de y D. H. Delphenich disponível em <<<https://www.neo-classical-physics.info>>>. A numeração de página na citação corresponde ao artigo original em alemão em disponível em <<<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01328377>>>.

<sup>6</sup> Schrödinger, E. (1926), Quantisierung als Eigenwertproblem. Ann. Phys., 384: 361-376. <https://doi.org/10.1002/andp.19263840404>

<sup>7</sup> Aqui temos a formulação da equação de Schrödinger dependente de tempo “onde  $t$  é a variável temporal,  $x$  é a variável espacial e  $\hbar = h/2\pi = 1,05457 \times 10^{-34}$  s é a constante de Planck dividida por  $2\pi$ . (ARTUSO; MARIM, 2020, p. 1).

Nesse caso há uma função de onda para cada partícula em uma região do espaço. A equação descreve a evolução temporal de tal onda.

Nos anos em que trabalhou no desenvolvimento dos fundamentos da mecânica ondulatória, o próprio Schrödinger identificou o átomo à onda de matéria: “afirmamos que o átomo é, na realidade, apenas o fenômeno de difração de uma onda eletrônica” (SCHRÖDINGER. 1933, p. 314).

Esse teria sido um passo chave: correlacionar o raio do átomo ao fenômeno de difração de uma onda do elétron<sup>8</sup>:

(...) há uma estreita relação entre a extensão da área de interferência com a qual o núcleo se envolve e o comprimento de onda, e os dois são da mesma ordem de magnitude. O que é isso, tivemos que deixar em aberto; mas o passo mais importante vem a seguir: identificamos a área de interferência, o halo de difração, com o átomo; afirmamos que o átomo, na realidade, é meramente o fenômeno de difração de uma onda de elétrons capturada, por assim dizer, pelo núcleo do átomo. Não é mais uma questão de acaso o fato de o tamanho do átomo e o comprimento de onda serem da mesma ordem de magnitude: é uma questão necessária [tradução nossa] (SCHRÖDINGER. 1933, p. 314).

Se o átomo é uma “onda de matéria”, ou em outras palavras, se a natureza fundamental da matéria é ondulatória, por que observamos partículas pontuais durante os eventos de medição em nossos arranjos experimentais? Se alguma coisa misteriosa ocorre durante a medição que nos leva a observar entidades como elétrons de forma discreta, granular, devemos considerar que antes da observação aquela mesma entidade propagava-se como uma onda? A concepção inicial de Schrödinger, por inúmeras razões, enfrentou dificuldades. David Bohm em *Causalidade e acaso na física moderna* pontua que a interpretação estatística da mecânica quântica proposta por Born representou, em termos interpretativos, uma guinada no entendimento da natureza da “onda quântica”:

---

<sup>8</sup> Com o passar do tempo a posição filosófica antimaterialista de Schrödinger foi se acentuando cada vez mais. Em 1958, em *A nossa imagem da matéria* ele considerava que “essa imagem da realidade material é hoje mais vaga e incerta do que foi por muito tempo (SCHRÖDINGER. 2000 [1958], p. 46). Em tal ocasião o físico filósofo defendeu que entidades físicas materiais como átomos e moléculas “podem no máximo ser pensadas como criações mais ou menos temporárias dentro do campo de ondas, cuja estrutura e variedade estrutural, no sentido mais amplo do termo, são tão clara e agudamente determinados por meio das leis de onda na medida em que reaparecem sempre do mesmo modo, que devem ocorrer *como se* fossem uma realidade material permanente (SCHRÖDINGER. 2000 [1958], p. 66). Para saber mais acerca das concepções filosóficas de Schrödinger ver: Silva, V. C. “A Filosofia da Natureza de Erwin Schrödinger”. *Ensaios Filosóficos*, Vol 4, pp. 167–184, 2011.

(...) Schrödinger propusera originalmente que o elétron devia ser pensado como uma distribuição contínua de carga. (...) Desse modo, as ondas de De Broglie e de Schrödinger deveriam ser interpretadas como ondas de carga elétrica. (...) Infelizmente, essa interpretação de Schrödinger só era defensável enquanto a onda permanecesse confinada no átomo. No espaço livre, um cálculo simples mostrara que, de acordo com a equação de Schrödinger, a onda deveria espalhar-se rapidamente, de modo ilimitado, por todo o espaço. (...) Para tratar desse problema, Born propôs que a intensidade da onda representa não uma densidade real de carga, mas, antes, a densidade de probabilidade de que o elétron – concebido como uma pequena partícula localizada – seja encontrado numa certa posição. Assim, o fato de a amplitude de onda para um elétron livre espalhar-se por todo o espaço deixou de estar em contradição com a aparição do elétron numa certa posição (BOHM, 2015, p. 167-168).

Como vimos, “Max Born em 1926, após o próprio Schrödinger determinar uma equação de onda dependente do tempo” defendera que a onda quântica não é uma onda de matéria, mas de probabilidade”<sup>9</sup> (CARUSO; OGURI. 2016, p. 423).

Mais uma vez, uma ideia de Einstein me deu a direção. Ele tentou tornar compreensível a dualidade das partículas - quanta de luz ou fótons - e das ondas, interpretando o quadrado das amplitudes das ondas ópticas como a densidade de probabilidade para a ocorrência de fótons. Esse conceito pôde ser imediatamente transportado para a função-  $\psi$ :  $|\psi|^2$  deve representar a densidade de probabilidade para elétrons (ou outras partículas) [tradução nossa] (BORN, 1964, p. 262).

A interpretação estatística da mecânica quântica de Born foi incorporada à literatura especializada e de certo modo tornou-se padrão. Vemo-la sendo reproduzida em artigos e livros especializados, livros didáticos e de divulgação e em círculos esotéricos e exotéricos. Feynmann a reproduz com clareza ao considerar um experimento mental, como a dupla fenda, em que um contador Geiger registra a passagem de cada elétron individual e ao final verificamos, ainda assim, um padrão ondulatório ao considerarmos os elétrons em conjunto:

(...) os elétrons chegam em unidades, como partículas, e a probabilidade de chegada dessas unidades está distribuída como a distribuição da intensidade de uma onda. É neste sentido que

---

<sup>9</sup> Schrödinger utilizou a equação independente de tempo em problemas de contorno para determinar, com sucesso, os espectros de energia do átomo de hidrogênio e do oscilador harmônico, sem estabelecer, entretanto, uma interpretação convincente das soluções para as funções de onda. Essa interpretação da função de onda como uma quantidade auxiliar a partir da qual se pode determinar as distribuições de probabilidade para a ocorrência dos valores das grandezas físicas associadas a uma partícula só foi estabelecida por Max Born, em 1926, após o próprio Schrödinger determinar uma equação de onda dependente do tempo, válida para a descrição de uma partícula em campos não conservativos, mas ainda no domínio não relativístico (CARUSO; OGURI. 2016, p 423).

um elétron se comporta “as vezes como partícula e às vezes como onda” (FEYNMANN, 2005, p. 139).

A resposta de Born, de que a função de onda representa uma “onda de probabilidade”, embora muito influente, não foi única e não se viu livre de problemas de interpretação. Como devemos encarar a coexistência ou superposição de tais probabilidades? Como simples valores estatísticos ou como estados físicos potenciais concomitantemente reais? A questão do problema da natureza da função de onda permaneceu em aberto. Mas qual é, exatamente, o “problema” em questão?

Em síntese, o problema da função de onda, e de seu colapso, pode ser resumido assim. Digamos que uma partícula  $\alpha$  se propaga entre dois pontos A e B do espaço  $E$  nos tempos  $T_1$  e  $T_2$ . Ora, se o comportamento de  $\alpha$  entre  $A(T_1)$  e  $B(T_2)$  deve ser descrito como uma função  $\Psi$  de onda conforme a Equação de Schrödinger, e se quando medimos  $\alpha$  em  $A(T_1)$  observamos não uma onda, mas um corpúsculo bem definido e quando medimos  $\alpha$  em  $B(T_2)$  observamos igualmente um corpúsculo, então, o que provocou o “colapso da função de onda” ou seja, a “redução” da onda que existe entre os eventos de medida em  $A(T_1)$  e  $B(T_2)$ , no corpúsculo observado durante as respectivas medições? A partir de qual pressuposto metafísico vamos encarar o problema da função de onda? Será possível adotar uma espécie de instrumentalismo operacional (neo)neopositivista e evitar o problema ontológico da natureza da função de onda?

O modo como interpretamos o sentido físico da função de onda é determinante na construção de nossa cosmovisão, afinal, se admitimos que a função de onda descreve a superposição de todos os estados quânticos possíveis, e que a cada estado quântico possível devemos associar não somente uma probabilidade, mas uma *realidade* física, então teremos que enfrentar grandes “estranhezas” quânticas e nos veremos diante de opções extremas.

Se antes do colapso da função de onda dois estados quânticos  $E_1$  e  $E_2$  são igualmente reais, e se  $E_1 =$  “No arranjo experimental  $x$  o elétron  $e$  está somente do lado esquerdo do aparato” e  $E_2 =$  “No arranjo experimental  $x$  o elétron  $e$  está somente do lado direito do aparato”, então teríamos que admitir que o elétron  $e$  está, ao mesmo tempo, *somente* do lado esquerdo e

somente do lado direito do aparato<sup>10</sup>, opção que parece tão absurda quanto a do gato estar vivo e morto ao mesmo tempo no experimento mental de Schrödinger.

Quais são nossas opções mais “extravagentes”? Ou bem podemos admitir, com Neumann (1955), London e Bauer (1939) e Wigner (1995) que há uma função de onda fisicamente real cujo colapso é provocado pelo observador consciente, ou bem podemos admitir com Everett (1973), no outro extremo, que não há colapso da função de onda de  $e$ . Quando observamos a entidade quântica em um estado ou outro, o estado quântico não-observado continua sendo tão fisicamente real quanto o observado.

Cada estado quântico provável é fisicamente real e cada estado quântico possível está sendo observado em um mundo possível. Assim, se existem muitos estados quânticos possíveis – todos reais – então existem muitos mundos possíveis – igualmente reais. Essa seria uma dedução a partir da existência de uma função de onda do universo, que nunca colapsa.

Para cada universo  $U_1$  em que um evento de medição  $E_M$  obteria como resultado da medição A ou B há um universo como  $U_2$  em que A é o caso e um universo  $U_3$  em que B é o caso, e assim sucessivamente, *ad infinitum*.

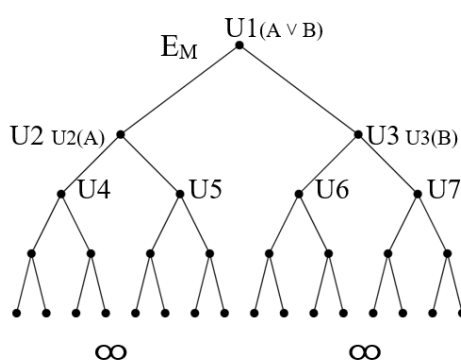


Figura 1: *Universal  $\psi$ -Function Tree*

<sup>10</sup> Em *Física e Filosofia*, no capítulo “Linguagem e realidade na física moderna”, Heisenberg oferece um exemplo que nos inspirou bastante. Conforme Heisenberg em mecânica quântica *não é verdade* que dado um sistema em que um átomo se encontra em uma caixa com uma parede divisória pela metade, tenhamos apenas duas proposições a afirmar, tais como o “átomo está somente do lado direito da caixa” e “o átomo está somente do lado esquerdo da caixa”. Nesse caso, ao contrário do que se passa na lógica clássica e na física clássica, temos que incluir uma terceira opção, que dê conta de um terceiro estado quântico possível, de modo tal que o princípio do terceiro excluído, *talvez*, não possa ser aplicado ao sistema de enunciados de mecânica quântica. Para mais detalhes ver Heisenberg, W. (1995). *Física e Filosofia*. Ferreira, J. L. Brasília: Editora UnB. p. 137. A esse respeito encontramos um experimento mental análogo em *Física em 12 lições* de Richard Feynmann. Pensando em um experimento do tipo dupla-fenda o autor pede que consideremos a seguinte proposição: “Proposição A: Cada elétron passa *ou* pelo orifício 1 *ou* pelo orifício 2”. Conforme Feynmann, “sem dúvida devemos concluir que *a proposição A é falsa*” (FEYNMANN, 2005, p. 137-139).

*A função de onda do universo* é um elemento fundamental na interpretação dos muitos mundos. Conforme Everett:

A validade geral da mecânica ondulatória pura, sem quaisquer afirmações estatísticas, é assumida para todos os sistemas físicos, incluindo observadores e aparelhos de medição. Os processos de observação devem ser descritos completamente pela função de estado do sistema composto que inclui o observador e seu sistema-objeto e que, em todos os momentos, obedece à equação de onda. (...) Como a validade universal da descrição da função de estado é afirmada, pode-se considerar as próprias funções de estado como entidades fundamentais, e pode-se até mesmo considerar a função de estado de todo o universo. Nesse sentido, essa teoria pode ser chamada de teoria da "função de onda universal", uma vez que se presume que toda a física decorre apenas dessa função [tradução nossa] (EVERETT, 1973, p 8-9).

Tal como abordada aqui, a interpretação de muitos mundos promoveria uma economia epistemológica, pois nos pouparia do problema do colapso da função de onda – não há colapso! – mas ao custo de uma hiper-inflação ontológica, multiplicando *many-worlds* indefinidamente. Qualquer que seja a interpretação, se assumimos a descrição ondulatória da MQ o problema da função de onda é nuclear para os fundamentos da mecânica quântica e para a elaboração de interpretações consistentes da MQ, e a ele se liga outro problema igualmente fundamental: o da medição.

### **O problema da medição na mecânica quântica**

O que é a medida na teoria dos quanta? É tal questão que se faz Lawrence Sklar em *Filosofia da Física*. Sklar é claro ao lembrar que tal questão não admite uma resposta única e simples, e que diferentes interpretações dividem a comunidade científica da MQ, (o que deve incluir físicos e demais cientistas de diferentes áreas que trabalham com MQ, filósofos da física, historiadores da mecânica quântica etc). Para resolver o problema, Sklar propõe que poderíamos tratar a função de onda em termos “clássicos”. Talvez isso nos permitiria resolver o problema.

A função de onda seria “apenas” uma medida da incompletude de nosso conhecimento de um sistema físico estatisticamente descrito, e o chamado colapso seria como um “recorte”



experimental de uma condição parcial do sistema. Lembremos que na interpretação de Born o problema do colapso da função de onda já possui outra conotação menos dramática, pois a “passagem” ou “mudança” em pauta não é a passagem de um estado físico para outro, mas a mudança, descontínua, do nosso conhecimento acerca de um estado físico.

Um conhecimento que era somente provável passa a ser um conhecimento efetivo no ato de medição. De certo modo Sklar parece ir na mesma direção, mas sua proposta não vai muito longe:

Ora, se conseguíssemos manter a interpretação da função de onda que, tal como algumas distribuições clássicas de probabilidades, faz dela uma representação do nosso conhecimento parcial de um sistema, poderíamos compreender tanto a medição como o postulado da projeção de forma bastante simples. A medição seria qualquer processo que acrescentasse algo ao nosso conhecimento do estado do sistema. Não seria, pois, de admirar que ao efetuar uma medida, a função que descreveria o nosso conhecimento parcial do sistema “saltasse” de modo descontínuo, determinado pelo postulado de projeção. Mas como vimos, tal interpretação da função de onda não consegue fazer justiça aos seus outros aspectos análogos a estados físicos, como a interferência (SKLAR, 2021, p. 253).

O evento físico da medição está no centro do problema do colapso da função de onda, pois, afinal, se há uma função de onda fisicamente *real* associada à partícula quântica entre A e B, ou se entre A no tempo  $T_1$  e B no tempo  $T_2$  a partícula  $\alpha$  é uma onda *real* de matéria, descrita pela função de onda  $\Psi(\alpha)$ , o fato é que são nos eventos de medição  $E_M$  do tipo  $E_{MA}(T_x)$  que a onda se reduz a uma entidade discreta.

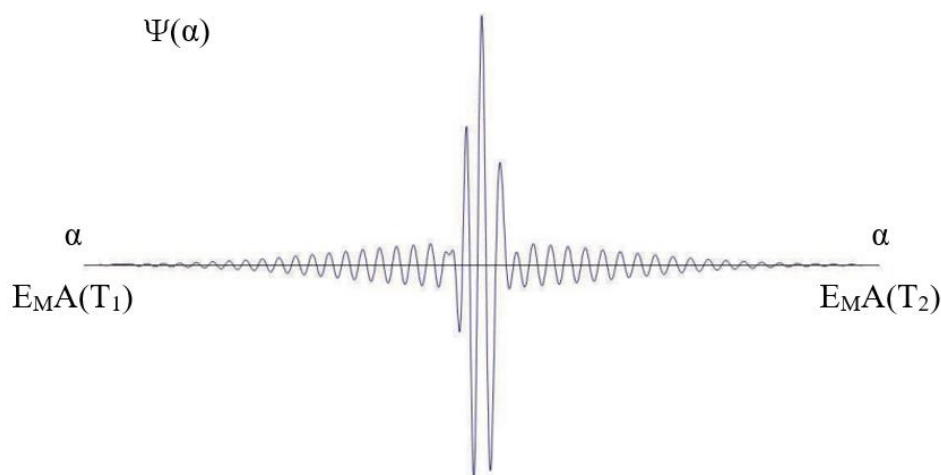


Figura 2: Nossa adaptação para “Representação gráfica de uma partícula quântica livre” (ARAÚJO; CORDOVIL; CROCA; MOREIRA; SILVA, 2011, p. 448)

Se a função de onda não é uma medida de nosso conhecimento parcial, então terá que ser tratada como a representação de um estado físico. Para Sklar “Se concebermos a função de onda como um tipo de estado físico do sistema, torna-se muito mais difícil compreender o lugar que tem no formalismo o processo de *medida*” (SKLAR, 2021, p. 253).

Estamos diante de situação aporética, em que ambas as soluções propostas são problemáticas. O problema da medida se torna ainda mais difícil quando consideramos a interpretação de Bohr, de acordo com o qual, quando utilizamos palavras como “experimento” em mecânica quântica não podemos deixar de considerar a

inevitável interação dos objetos atômicos em exame com os instrumentos de medida indispensáveis para esse fim. (...) [a] impossibilidade de qualquer separação nítida entre o comportamento dos objetos atômicos e a interação com os instrumentos de medida que servem para definir as condições em que os fenômenos aparecem” (BOHR, 1995, p. 24, 51).

A interpretação do “quanta de ação” de Louis de Broglie converge com a de Bohr. Para o físico francês:

Poderemos conhecer a realidade física duma maneira objetiva, independente dos processos empregados para a conhecer? Por outras palavras: podemos desprezar ou, pelo menos, por à margem as perturbações que os nossos métodos de observação ou de medida podem introduzir no estado das entidades físicas que pretendemos descrever? A estas perguntas a Física atual responde negativamente. Em consequência da existência do *quanta de ação* é impossível diminuir indefinidamente a reação dos nossos processos de observação sobre os elementos muito sutis que temos de observar para descrever o mundo atômico (DE BROGLIE, 1955, p. 38).

Se, por analogia, estendermos tal “princípio” aplicado por Bohr e De Broglie às relações de incerteza de Heisenberg ao problema do colapso da função de onda, consideraríamos que o mesmo não é provocado pelo observador consciente, conforme Von Neumann, London e Bauer e Wigner, mas pela interação entre o sistema físico medido e o aparato de medida.

## **A Interpretação Emergentista e o problema da medição**

Em *Para uma interpretação emergentista do problema da medição; uma hipótese de trabalho*, publicado no “Dossiê de Filosofia da Física” de *Perspectivas*, o filósofo da física português, João Luis Cordovil realiza com simplicidade e didatismo uma tarefa que está longe de ser das mais fáceis, a saber, a de introduzir o leitor ao estado da arte de um campo de pesquisa de alta *expertise*, e de contribuir para a literatura especializada acrescentando algo de novo ao debate.

A questão apresentada e enfrentada por Cordovil, é, como o próprio autor adianta já no resumo do trabalho, o grande, ou talvez o “único problema” da Mecânica Quântica, o problema da medição. Entendemos a colocação do autor. Claro que existem, entre aspas, outros problemas filosóficos, tanto de ordem ontológica e epistemológica, quanto de ordem lógico-semântica na filosofia da mecânica quântica, como o da natureza das entidades quânticas, os limites e pretensões dos modelos e teorias científicas enquanto sistemas fechados de enunciados de mecânica quântica, o problema de como interpretar o princípio de incerteza de Heisenberg. Tal abundância de tópicos e subtópicos, e a gama de possibilidades epistemológicas e hermenêuticas, por assim dizer, dá azo a proliferação de interpretações da MQ.

Alguns autores se restringem a poucas interpretações, outros falam em dezenas. Conforme Pessoa Jr, adotando uma posição pluralista quanto as interpretações da MQ podemos chegar a um resultado expressivo: “A atitude pluralista, no caso da física quântica, é admitir que há dezenas de interpretações e que qualquer uma que não seja refutável e autocontraditória deve ser admitida como uma possibilidade” (PESSOA JR., 2011, p. 296).

Ao fim e ao cabo, Cordovil nos parece correto quando identifica no problema da medição o grande problema da MQ, e isto, nos permitindo o trocadilho, não por que esses outros problemas de filosofia da MQ possam ser reduzidos ao problema da medição, mas por que talvez emerjam dele. Se resolvêssemos o problema da medição, se não todos, ao menos uma grande parte dessas questões também se dissolveria.

O problema da medição, nos sugere o autor, pode ser entendido de diversos modos: “Na literatura, podemos encontrar várias maneiras de formular o problema de medição” (CORDOVIL, 2022, p. 142).

Apresentaremos o problema em três partes – uma formulação tripartite ou um “trilema” – sendo cada qual uma pergunta cuja resposta é necessária, mas não suficiente, para a elucidação da questão seguinte:

1. Qual é a natureza [do estado] de um sistema quântico – ou como podemos descrever um sistema quântico – entre dois eventos, A e B, de medição?
2. Como se dá a transição de um estado de sobreposição quântica representada por  $\psi$ -função para um estado clássico bem definido?
3. Assumindo que tal transição se dê por meio de um evento  $E$  não-local de “colapso da função de onda”, o que o provoca?

O problema pode ser formulado de maneira recorrente na literatura especializada por meio de um trilema desenvolvido por Ladyman e Ross:

- 1) Todas as medições têm resultados únicos.
- 2) A descrição da realidade pela mecânica quântica é completa.
- 3) A única evolução temporal dos sistemas quânticos está de acordo com a equação de Schrödinger.

O problema é que a Mecânica Quântica frequentemente atribui aos objetos quânticos superposições com relação às propriedades que podemos medir. [...] Não parece que observamos superposições de objetos macroscópicos, como dispositivos de medição, que contradigam (1) e, portanto, temos um problema se continuarmos a supor que a partícula e o aparelho realmente não têm estados definidos de acordo com (2) e que a evolução do tempo está sempre de acordo com (3) (LADYMAN; ROSS, 2007, p. 180-181).

Cordovil nos adverte para “uma vasta gama de opções” de candidatas a soluções para o problema áureo da MQ e nos chama a atenção para o fato de que a maioria das soluções assume como pressuposto que a mecânica quântica é universalmente aplicável a todos os sistemas físicos. Penso que tal pressuposto seria uma re-formulação particular do princípio da relatividade aplicado à MQ: *As leis da mecânica quânticas são as mesmas em todos os sistemas físicos  $S$ , em que descrevemos a evolução temporal do vector de estado  $\phi$  [representado pela  $\psi$ -function] determinado pela equação de Schrödinger em um espaço de Hilbert* <sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Conforme Einstein em “A Teoria da Relatividade Especial e Geral”, o princípio da relatividade estabelece que “toda lei geral da natureza deve estar constituída de tal maneira que se transforma em uma lei de forma exatamente igual quando, em lugar das variáveis espaçotemporais  $x, y, z, t$ , do sistema de coordenadas original  $K$ , introduzimos novas variáveis espaçotemporais  $x', y', z', t'$  de um sistema de coordenadas  $K'$  (EINSTEIN, 1999, p. 40).

A proposta de Cordovil em sua hipótese de trabalho possui dupla face. Por um lado, coloca em xeque o “pressuposto da universalidade”, por outro, postula uma ontologia emergentista, de acordo com a qual as entidades clássicas não devem, *strictu sensu*, ser reduzidas às entidades quânticas.

Em nosso entendimento do autor, diríamos que seria mais correto considerar uma ontologia em que de um campo quântico de possibilidades emergem entidades físicas clássicas. Dentre os diversos formalismos da MQ, considerando a axiomatização canônica de Dirac-von Neumann como referência, Cordovil opta por trabalhar com os cinco axiomas de Jammer (1974/1975), de acordo com os quais, em nossa síntese (cf. JAMMER, 1974, p. 5):

- a. A MQ é completa – o estado de um sistema quântico  $S$  corresponde a uma função de onda em um espaço vectorial e a função de onda descreve completamente  $S$  [Axiomas I-II].
- b. Os sistemas quânticos evoluem deterministicamente segundo a equação de Schrödinger e estão, “em geral, em estado de sobreposição” entre medições, e em estado clássico durante – ou “após” – as medições [Axiomas I-IV].
- c. Por ocasião da medição, ocorre uma transição “instantânea, irreversível e não linear”, de  $\phi$  para  $\kappa$ , em que  $\phi$  é o estado quântico e  $\kappa$  é o estado clássico. Sendo assim, uma transformação não-local de  $\phi$  em  $\kappa$  corresponde ao chamado “colapso da função de onda”.

Por evento não-local ou por não-localidade quântica, entendo, no escopo desse trabalho, a propriedade de sistemas quânticos colapsarem instantaneamente no ato de medida. O termo se refere ao colapso não-local de entidades quânticas emaranhadas. Os axiomas de Jammer dividem-se em duas partes.

---

O problema aqui é com o entendimento da concepção de “lei geral da natureza”. A rigor, não há lei universal no sentido de “lei geral da natureza” cujo domínio de aplicação abranja igualmente o nível quântico e o nível clássico. No entanto, podemos, como é usual em lógica clássica e teoria dos conjuntos, tomar o conceito de “universal” não como sinônimo de “igualmente válido em todas as regiões, dimensões e sistemas físicos do universo, seja em macro ou microescala”, mas a partir de outra definição: “Universal é aquilo que é válido para toda a extensão de um conjunto  $C$ ”, ou, dito de outra forma, “Universal é aquilo que se aplica a ‘Todos’ (Ou, por negação, a ‘Nenhum’) dos elementos de uma classe”. Assim, as leis gerais da mecânica quântica seriam universais não porque se aplicariam a todo o universo físico, tanto em escala subatômica quanto em escala clássica, mas porque se aplicariam a *Toda* a extensão do conjunto  $Q$ , o conjunto de enunciados de eventos subatômicos – e quiçá, seria negativamente universal em relação ao mundo clássico, por não se aplicar a *Nenhum* dos enunciados de eventos clássicos. Claro que a pretensa solução é aporética, pois se de um lado preservamos a universalidade tanto das leis da MQ quanto das leis relativísticas, de outro mantemos – e mesmo reforçamos – a partição entre o mundo clássico descrito pela Relatividade e o mundo subatômico descrito pela mecânica quântica, o que sacrifica o *santo graal* da física contemporânea, que é a busca pela unificação de ambas.

No primeiro conjunto, os axiomas I-IV descrevem um sistema físico como a sobreposição de estados quânticos observáveis com determinado valor de probabilidade:

**Axiom I.** To every system corresponds a Hilbert space  $H$  whose vectors (state vectors, wave functions) completely describe the states of the system.

**Axiom II.** To every observable  $P$  corresponds uniquely a self-adjoint operator  $A$  action in  $H$ .

**Axiom III.** For a system in state  $\varphi$ , the probability  $\text{prob}_A(\lambda_1, \lambda_2 | \varphi)$  that the result of a measurement of the observable  $P$ , represented by  $A$ , lies between  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  is given by  $\| (E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})\varphi \|^2$ , where  $E_\lambda$  is the resolution of the identity belonging to  $A$ .

**Axiom IV.** The time development of the state vector  $\varphi$  is determined by the equation  $H\varphi = i\hbar \partial\varphi/\partial t$  (Schrödinger equation), where the Hamiltonian  $H$  is the evolution operator and  $\hbar$  is Planck's constant divided by  $2\pi$ . (JAMMER, 1975, p. 5)<sup>12</sup>.

No conjunto 2, o axioma V narra a transformação abrupta desse sistema físico quântico em um sistema físico clássico:

**Axiom V.** If the measurement of the observable  $P$ , represented by  $A$ , yields a result between  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , then the state of the system immediately after the measurement is an eigenfunction of  $(E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})$  (JAMMER, 1975, p. 5).

Cordovil é claro, em meu entendimento, ao mostrar como para von Neumann o problema da mudança – ou da evolução linear ou não-linear dos sistemas físicos – é, por assim dizer, o centro heurístico do problema da medição. Simões em *A Concepção Física do Mundo* destaca que von Neumann desejava “encontrar o exato local de sua ocorrência [do colapso da função de onda], algo que era essencial para a sua interpretação da mecânica quântica”. (SIMÕES. 2021, p. 193). Para Simões Neumann “acabou por inaugurar a noção de ‘paralelismo psicofísico’, que preconiza que o corte entre sujeito e objeto quântico pode ser traçado em

<sup>12</sup> Aqui, especificamente pelo teor técnico do trecho, preferimos preservar o original, inserindo nossa tradução em nota de rodapé: “Axioma I. A cada sistema corresponde um espaço de Hilbert  $H$  cujos vetores (vetores de estado, funções de onda) descrevem completamente os estados do sistema.

Axioma II. A cada observável  $P$  corresponde exclusivamente um operador autoadjunto  $A$  em  $H$ .

Axioma III. Para um sistema no estado  $\varphi$ , a probabilidade  $\text{prob}_A(\lambda_1, \lambda_2 | \varphi)$  de que o resultado de uma medição do observável  $P$ , representado por  $A$ , esteja entre  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  é dada por  $\| (E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})\varphi \|^2$ , em que  $E_\lambda$  é a resolução da identidade pertencente a  $A$ .

Axioma IV. O desenvolvimento temporal do vetor de estado  $\varphi$  é determinado pela equação  $H\varphi = i\hbar \partial\varphi/\partial t$  (equação de Schrödinger), em que o Hamiltoniano  $H$  é o operador de evolução e  $\hbar$  é a constante de Planck dividida por  $2\pi$ . [Nossa tradução] (JAMMER, 1975).

qualquer ponto da cadeia ligando o objeto ao observador” (*Idem*). Sobre a interpretação de Von Neumann, Silva pontua que

John von Neumann propõe em *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1932) que é a medida (mensuração, ou “evento de observação”) que faz com que a “função de onda” se materialize em um objeto físico tal como um elétron (ou bem em forma particular (discreta) ou bem em forma ondulatória). Neumann assume que a medida pressupõe um observador e sustenta que qualquer tentativa de estabelecer uma demarcação precisa entre o sujeito senciante que realiza a medida, o evento de medição e o objeto medido, é arbitrária. A consciência do sujeito da medição constitui parte do sistema físico no qual a medida é tomada, de modo que o processo de medição só está completo quando se torna parte da consciência do medidor (Neumann. 1955: 419). Em última instância, é o observador a peça chave do colapso da função de onda (SILVA, 2017, p. 91).

Como vimos na primeira seção desse artigo, a interpretação “mentalista” seria continuada – e quiçá radicalizada – tempos depois por Eugene Wigner em obras como *Philosophical Reflections and Synthese* (1955). Nessa ocasião não nos importa levar em conta a interpretação de Von Neumann e Wigner sobre “quem” ou “o que” provoca o colapso da função de onda, mas “como” ele ocorre, se de modo instantâneo ou temporalmente determinado.

Conforme von Neumann, no ato de medição, que provocaria o colapso, há dois tipos de mudança. A mudança 1 corresponde à passagem descontínua de um sistema A para B, a mudança 2 seria a evolução contínua, temporal e linear de um sistema.

Von Neumann em *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, apresenta a questão. O cerne do problema é a medição de sistemas quânticos. Em um tipo a medição é “abrupta” e, portanto, pode ser entendida como “instantânea”, ao passo que em outro tipo a medição é “temporalmente dependente”:

Portanto, temos dois tipos fundamentalmente diferentes de intervenções que podem ocorrer em um sistema S ou em um conjunto  $[S_1, \dots, S_N]$ . Aqui aludimos primeiro às mudanças abruptas

1

$$U \longrightarrow U' = \sum_{n=1}^{\infty} (U\phi_n, \phi_n) P_{[\phi_n]}$$

que são provocadas pela medição ( $\phi_1, \phi_2, \dots$  é um conjunto ortonormal completo) e, em segundo lugar, para as transformações dinâmicas temporalmente graduadas

## 2

$$U \longrightarrow U_t = e^{-\frac{i}{\hbar}tH} U_0 e^{+\frac{i}{\hbar}tH}$$

que são geradas pelo operador de energia (Hamiltoniano)  $H$ , que aqui se supõe ser independente do tempo. (...) Em primeiro lugar, é digno de nota que 2 admite (da maneira descrita acima) a possibilidade de  $H$  ser dependente do tempo, de modo que se poderia esperar que 2 fosse suficiente para descrever intervenções causadas por medições: de fato, uma intervenção física não pode ser outra coisa senão a inserção temporária de um certo acoplamento de energia no sistema observado, ou seja, a introdução em  $H$  de uma certa dependência de tempo (prescrita pelo observador). (...) Em segundo lugar, é preciso observar, com relação a 1, que mostramos repetidamente que uma medição no sentido de 1 deve ser instantânea, ou seja, deve ser realizada em um tempo tão breve que a mudança de  $U$  dada por 2 não seja perceptível [tradução nossa] (VON NEUMANN, 2018, p. 230).

O problema da medição, portanto, no formalismo de von Neumann, prossegue Cordovil, decorre da diferença de natureza desses dois tipos de mudança:

Este formalismo de duas partes da MQ tem suas origens na distinção de von Neumann entre dois tipos de mudanças: Mudança 1 - arbitrária - que ocorre durante a realização de uma medição e Mudança 2 - automática - a evolução unitária que ocorre enquanto nenhuma medição é feita (Von Neumann, 1932, 2018: 230). A mudança 1 é descontínua, instantânea, irreversível, não-linear; a mudança 2 é contínua, temporal, reversível, causal, linear. O "problema da medição" da MQ – problema central e de longa data da MQ – pode-se dizer que, de forma genérica, surge da oposição entre a Mudança 2 e a Mudança 1; entre a evolução determinística e linear descrita pelos primeiros axiomas da MQ e a modificação indeterminística e não linear representada pelo último postulado de MQ (CORDOVIL, 2022, p. 142).

Cordovil entende que o tipo de evolução ou mudança presente nos axiomas I-IV é o de mudança “contínua, temporal, reversível, causal e linear” e o tipo de evolução ou mudança assumido pelo axioma V é “descontínuo, instantâneo, irreversível, não-linear”. Há, portanto, nas palavras do autor, uma “tensão interna entre os axiomas I-IV e o axioma V” (CORDOVIL, 2022, p. 143). Essa tensão não se limita a relação entre dois grupos de “axiomas de Jammer”, a saber,  $a^1$  e  $a^2$ , e nem a relação entre dois grupos de “mudanças de Von Neumann”,  $m^1$  e  $m^2$ , mas abrange a relação entre os axiomas de Jammer e os tipos de mudança de von Neumann:



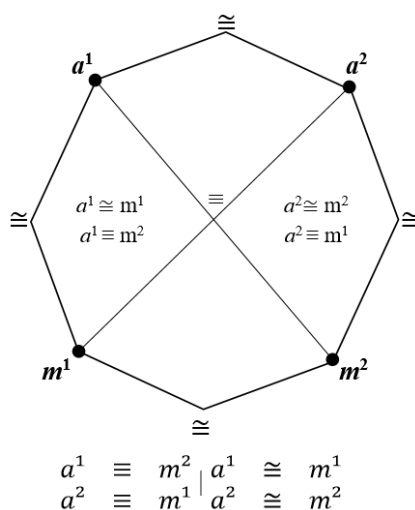


Figura 3: Relações entre axiomas de Jammer e tipos de mudança de von Neumann.

Relacionando os tipos de mudança descritos por von Neumann com os axiomas de Jammer para a MQ, conforme o octógono acima<sup>13</sup>, temos que se a primeira parte dos axiomas é igual  $a^1$  e a segunda a  $a^2$ , e a Mudança 1 é igual a  $m^1$  e a Mudança 2 a  $m^2$ , então, podemos dizer que o grupo 1 dos axiomas de Jammer  $a^1$  é congruente, somente, com o grupo 2 de mudanças de Von Neumann  $m^2$  e o grupo 2 dos axiomas de Jammer  $a^2$  é congruente, somente, com o grupo 1 de mudanças de Von Neumann  $m^1$ . Da mesma forma, o grupo 1 dos axiomas de Jammer  $a^1$  é incongruente com o grupo 1 de mudanças de Von Neumann  $m^1$  e o grupo 2 dos axiomas de Jammer  $a^2$  é incongruente com o grupo 2 de mudanças de Von Neumann  $m^2$ .

<sup>13</sup> No octógono, nos planos superior e inferior temos os tipos de axiomas,  $a^1$  e  $a^2$  acima, e mudanças  $m^1$  e  $m^2$ , abaixo. As relações diagonais  $a^1$  e  $m^2$  e  $a^2$  e  $m^1$  são congruentes ( $\equiv$ ) e as relações laterais verticais  $a^1$  e  $m^1$ , à esquerda e  $a^2$  e  $m^2$ , à direita, são incongruentes ( $\cong$ ), assim como as relações horizontais. Por congruência entendemos aqui a propriedade de axiomas e tipos de mudanças poderem ser afirmados concomitantemente, e por incongruência a propriedade de axiomas e mudanças não poderem ser afirmados concomitantemente. A rigor  $a^1$  e  $a^2$  só são de fato incongruentes se quisermos preservar o realismo local e postular que o colapso da função de onda não pode ser instantâneo, que a medição feita por A não pode modificar instantaneamente o estado de B, conforme Einstein, A; Podolsky, B; Rosen, N. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Phys. Rev.* 47, 10 (1935), pp. 777–780. Por outro lado, se sacrificamos o realismo local e consideramos, com Bell, que na medida em MQ "the signal involved must propagate instantaneously" (BELL, 1964, p. 199), então não há incongruência entre  $a^1$  e  $a^2$ . Sobre a refutação do realismo local pela confirmação da violação das desigualdades de Bell ver Aspect (2015) e Olival em (2022). Conforme Aspect "Bell made the groundbreaking discovery that some predictions of quantum physics conflict with Einstein's local realist world view" (ASPECT, 2015). O próprio Aspect, por sua vez, é uma peça fundamental dessa história, pois seu trabalho experimental com emaranhamento quântico desferiu um duro golpe – quiçá mortal? – no realismo local defendido por EPR. Como enfatiza Freire Jr: "Aspect's seminal experiments, the results of which were published in 1981–1982, and his doctoral thesis presented in Paris in 1983, lie midway in this story. They were major breakthroughs in our understanding of the conflict between quantum mechanics and local realism and the establishment of entanglement as part of the physics conceptual and practical toolkit. Furthermore, they were also a turning point in the recognition among physicists of how good the physics being done on the foundations of quantum mechanics was" (FREIRE JR., 2022, p. 248).

Em sentido físico essa tensão representa a enigmática, nebulosa e problemática passagem, no ato de medição, da realidade quântica entre-medidas para a realidade clássica inter-medida. Em sentido ontológico é como se o evento de medição, alterasse, de modo não-local, a natureza do objeto da medição. Ora, mas se a teoria quântica é universal e, portanto, válida para todos os sistemas físicos, por que não observamos efeitos quânticos em escala clássica, ou, nas formulações de Ladyman, Ross, Maudlin, Myrvold e tantos outros, se a teoria quântica é uma descrição completa da realidade [e, portanto] é, em princípio, aplicável a todos os sistemas físicos (CORDOVIL, 2022) então porque, “em resultado de uma medição, um sistema em ‘sobreposição quântica’ se ‘transforma’ em um sistema em um estado bem definido?” (CORDOVIL, 2022, p. 143).

Portanto, i) se considerarmos que MQ é uma teoria universal; ii) se considerarmos que uma propriedade de ser "quântico" é a propriedade de estar em um estado de sobreposição; iii) e se considerarmos que uma propriedade de ser "clássico" é a propriedade de estar em um estado bem definido, então, o problema da medição, em geral, pode ser enunciado da seguinte forma: como, em resultado de uma medição, um sistema em "sobreposição quântica" se “transforma” em um sistema em um estado bem definido? (CORDOVIL, 2022, p. 143).

O problema da medição nos leva aos limites lógicos da contradição, pois ou bem o Axioma V de Jammer e a Mudança 2 de von Neumann são o caso, ou bem o postulado 2 de Ladyman & Ross é o caso. Dito de outra forma, ou a mecânica quântica é uma descrição completa da realidade (Postulado da universalidade da MQ) ou no ato de medição há um colapso da função de onda, donde resulta um sistema físico clássico, sem sobreposição de estados, e, portanto, não-quântico<sup>14</sup>.

Eis a natureza dramática do problema da medição. O problema não está somente na coexistência de dois níveis de realidade, mas no colapso, na implosão não-local na velocidade de um *fiat-lux*, de um nível em outro. Cordovil explica didaticamente, de modo simples e claro,

---

<sup>14</sup> Consideramos que estudos ulteriores devem problematizar em que medida postular a universalidade da mecânica quântica é, em sentido lógico e epistemológico rigoroso, o mesmo que assumir que a MQ é uma descrição completa da realidade. É de suma importância levar em consideração a prescrição de Bohm: “Para definir em que medida uma lei é verdadeira precisamos, entre outras coisas, delimitar seu *domínio de validade*”. (BOHM. 2015: 295).

algumas tentativas de enfrentamento do problema da medição, como a de von Neumann que, de acordo com Cordovil, pressupõe que tal passagem só pode ser explicada à luz da introdução de um “sujeito da medição”<sup>15</sup> no sistema físico descrito pelo que chamarei de objeto da medida + aparato de medição:  $O_M + A_M$ .

O que é assumido pelo Axioma V só ocorre quando o sistema quântico  $Q$  como um todo é dado pela soma do que chamarei, nesse trabalho, de objeto da medida + aparato de medição + sujeito da medição:  $\psi-Q = O_M + A_M + S_M$ . Como vimos, para von Neumann, o sujeito da medição não pode ser uma máquina, um computador, etc. Nas palavras de Cordovil, “Von Neumann é levado a considerar que a transformação irreversível do estado do sistema medido seria devido à consciência do observador”<sup>16</sup> (CORDOVIL, 2022, p. 145). Isto é, “seria a consciência [ou a tomada de consciência] do observador que levaria ao colapso da função de onda” (CORDOVIL, 2022, p. 145).

Outras tentativas de solução do problema da medição seriam não menos radicais, como a de Everett, que nega o colapso da função de onda, mas ao preço de admitir a função de onda do universo e, portanto, a realidade física dos muitos mundos sobrepostos resultantes. Na teoria de De Broglie-Bohm, nos diz Cordovil, “A MQ não descreve inteiramente os sistemas quânticos” (CORDOVIL, 2022, p. 146), sendo, portanto, incompleta. Encontramos aqui os ecos do debate entre Einstein e Bohr, e as razões de trabalhos como, por exemplo, o do paradoxo EPR. Einstein, um dos fundadores da teoria quântica com seu artigo sobre o efeito fotoelétrico e a quantização da luz passou décadas defendendo que a mecânica quântica, tal como interpretada pela ortodoxia de Copenhague, não poderia ser considerada uma teoria física completa. Outra classe de interpretações seria a GRW, Ghirard-Rimini-Weber, com variantes,

---

<sup>15</sup> Citando Cordovil: “No trabalho de Von Neumann de 1932, ele aponta que uma característica fundamental da medição é a existência de um acto perceptivo por um sujeito (VON NEUMANN, 2018, p. 272). Uma medição não é totalmente caracterizada se considerarmos apenas a interação física entre o objeto de medição e o dispositivo de medição. Para completar, deve existir um sujeito que esteja ciente do resultado da medição” (CORDOVIL, 2022, p. 244).

<sup>16</sup> Para uma discussão da natureza do observador (*observer*) em Von Neumann e o problema do *principle of psychophysical parallelism*, ver o capítulo VI, “The measuring process”, p. 271-273, de “Mathematical Foundations of Quantum Mechanics” (NEUMANN, 2018).

que negam o colapso abrupto e defendem um “colapso suave devido a um processo contínuo” (CORDOVIL, 2022, p. 146).

Se pensarmos nos axiomas de Jammer, nos tipos de mudança de von Neumann e no trilema do Problema da Medição, colocando-os lado a lado com as interpretações candidatas a soluções para o Problema da Medição, veremos que a Interpretação dos Muitos Mundo de Everett rejeita o Axioma V, a Mudança 1, e o postulado I. do trilema, a saber, “Todas as medições tem resultados únicos”. A Interpretação de De Broglie-Bohm rejeita o postulado 2 do trilema, “a descrição da mecânica quântica da realidade é completa”, e por fim, a classe GRW nega o postulado 3 do trilema, a saber, “A única evolução temporal para sistemas quânticos está de acordo com a equação de Schrödinger” (CORDOVIL, 2022, p 145).

O que tais possíveis soluções possuem em comum é o fato de defenderem um realismo da função-de-onda. Nas palavras de Cordovil, para tais abordagens “A função de onda não seria um mero dispositivo formal, mas uma representação matemática de uma onda real ou de um campo que seria o fundamento da realidade quântica” (CORDOVIL, 2002, p. 146).

O artigo de Cordovil pode ser dividido, grosso modo, em duas partes. Na primeira o autor, com concisão e clareza conceitual, recorrendo com desenvoltura pela literatura especializada da área, nos apresenta um breve panorama do estado da arte do problema da medição. Na segunda parte o autor começa a esboçar sua hipótese de trabalho. Para tanto, antes da construção de um novo edifício, por mais inicial que seja a etapa da obra, se faz necessário limpar o terreno, removendo as pedras no meio do caminho.

Quais teses, doutrinas metafísicas, postulados, conceitos, representam obstáculos desnecessários, dos quais devemos nos desvencilhar ou assumir nesse caso? No caso concreto, o autor irá romper tanto com o reducionismo ontológico em física, que pode ser bidirecional (bidirecional porque podemos tentar reduzir o nível clássico ao quântico ou o quântico ao clássico, o que nos parece menos comum) quanto com o postulado da universalidade da mecânica quântica. Cordovil considera que “É uma herança atomística supor que as teorias físicas fundamentais – isto é, as teorias sobre as entidades mais simples mereológicas – se aplicam a todos os domínios físicos” (CORDOVIL, 2022, p. 147). Dito de outro modo, seria uma

herança filosófica atomista pressupor que o mais complexo deva ser reduzido ao mais simples, que a natureza última da realidade, o que é ontologicamente fundamental, é o que há de mais básico e elementar, e, portanto, primeiro e “original”, na hierarquia dos entes.

Pensamos que a herança é mais antiga e mais geral e que o programa de redução da realidade fenomênica sensível, plural e complexa, a causas únicas, simples e inteligíveis, não é somente típica do atomismo de Newton, como pontua Cordovil, mas da própria cosmologia grega desde os *physikós* jônios. Tomando como referência a “Evolução da Física” de Einstein e Infeld e “A Natureza e os Gregos” de Schrödinger, a característica fundamental da filosofia natural, desde os gregos, é a busca pela unificação do real, unidade que seria conquistada quando da plena redução do mais complexo ao mais simples:

Em toda a história da ciência, desde a filosofia grega até a física moderna, verificaram-se tentativas constantes de reduzir a aparente complexidade dos fenômenos naturais a algumas ideias e relações fundamentais simples. Esse é o princípio subjacente de toda filosofia natural (EINSTEIN; INFELD, 2008, p. 53).

Como Silva (2021) defende em *Filosofia Natural, Física teórica e Metafísica: Da física dos filósofos antigos a filosofia dos físicos modernos*, “Schrödinger considera os *physikós* como Tales os primeiros cientistas” justamente por buscarem explicar a diversidade e a complexidade dos eventos, entidades e sistemas físicos aparentes por meio de causas únicas, simples e inteligíveis (SILVA, 2021, p. 279). Nas palavras de Schrödinger um dos passos fundamentais para o nascimento da ciência dentre os filósofos gregos se deve justamente a essa busca pela unidade da natureza. Trata-se do reconhecimento de que “toda a matéria que compõe o mundo tem, em toda a sua infinita variedade e apesar de tudo, tanto em comum que deve ser, intrinsecamente, o mesmo elemento” (SCHRÖDINGER. 1996, p. 59).

Quando em sua hipótese de trabalho Cordovil questiona se “deveríamos supor que todos os domínios físicos da realidade são redutíveis a um outro” (CORDOVIL, 2022, p. 148), propondo, no lugar do “reducionismo”, o emergentismo, ele não estaria apontando para um caminho que rompe não somente com a herança tradicional da metafísica atomista, mas com o

grande projeto de unificação que marcaria, em tese, a própria história da física?<sup>17</sup> Entendo que não há ônus se for o caso. O autor estaria, ainda que com todo o cuidado e prudência possíveis, filiando-se a um empreendimento audaz. Conforme Gil Santos em *Integrated-structure emergence and its mechanistic explanation*, o emergentismo é, por sua própria definição, oposto ao reducionismo, e por isso, é um conceito valioso para a Filosofia da Ciência<sup>18</sup>:

A razão pela qual a noção de emergência adquiriu uma importância inegável na filosofia da ciência é que ela sempre foi definida em oposição a alguma noção de redução ontológica e/ou epistemológica, como uma relação entre certos conjuntos e suas partes, em que essas entidades pertencem a diferentes níveis de organização e diferentes estágios de desenvolvimento ou evolução [tradução nossa] (SANTOS, 2021, p. 8688).

O que Cordovil propõe – com as devidas vênias de quem está a apresentar uma hipótese a ser desenvolvida – é rejeitar o reducionismo e o postulado da universalidade da MQ em nome da “emergência ontológica”. Mas o que o autor considera como “emergência ontológica”?

Por emergência ontológica estou a considerar o aparecimento de uma entidade com uma nova propriedade, comportamento ou lei que é relativamente autónoma e não é completamente redutível à adição do conjunto de propriedades, comportamentos ou leis das partes ou entidades que a geraram ou que a compõem (CORDOVIL, 2022, p. 148).

O conceito de “emergência ontológica” também foi adotado por Gil Santos em *Ontological Emergence: How is That Possible? Towards a New Relational Ontology*:

A emergência ontológica pode ser conceituada como ocorrendo na transição entre diferentes níveis de composição e organização (relações partes-todo), ou na transição entre diferentes

<sup>17</sup> Não consideramos que tal questão possa ser respondida facilmente. Os antigos *Physikós* jônios, eram, de fato, “reducionistas” em sentido rigoroso? Todo projeto de “unificação” deve ser necessariamente um projeto de “redução”? Acreditamos que tais questões podem ser problematizadas sem que unificação e redução sejam tomadas como processos necessariamente interligados e co-dependentes.

<sup>18</sup> Assim como Pessoa Jr. em “Emergência e redução: uma introdução histórica e filosófica”, “Devemos, porém, ressaltar aqui que a discussão entre redução e emergência já fazia parte da tradição filosófica que remontava à Antiguidade” (PESSOA JR., 2013, p. 23). De acordo com Pessoa Jr “na Grécia e Roma antigas”, ao reducionismo dos atomistas, se opunham “o estoicismo e o hilemorfismo de Aristóteles”. Devemos também nos atentar para o problema da “geração” e para a teoria das causas em Aristóteles. Na *Metafísica* Aristóteles defendera que todas as coisas são “geradas” por outras”. O termo grego utilizado VII, 7,15 é *γενεσεις* (*geneseis*), geração, origem, criação, e também, “possivelmente”, algum sentido de *vir-a-ser*, de aparecer ou mesmo de “emergir como algo novo”, assim como uma pessoa que nasce de outra é uma nova pessoa, ou um instrumento que vem a ser por meio de um artesão é um novo ente. Heidegger, na tradução de Ernildo Stein do alemão para o português para “A Sentença de Anaximandro diz que “[...] *gênesis* não significa, de maneira alguma, um desenvolvimento genético”. *Gênesis* deve ser pensada “a partir da *phýsis* e no seio dela, como maneiras do aparecer [...] Podemos, certamente, traduzir *gênesis* por surgir [...] *gênesis* é o avançar e o advir para o desvelado [...]” (HEIDEGGER., 1973, p. 36).

estágios temporais de desenvolvimento. Portanto, um fenômeno emergente pode ser concebido como um efeito global em relação às suas diversas causas parciais, como um sistema composto em relação às suas partes constituintes, como uma propriedade em relação às propriedades de nível inferior ou como um estágio de um processo em relação aos estágios anteriores [tradução nossa] (SANTOS, 2015, p. 430).

Sendo assim, embora uma entidade  $y$  qualquer seja proveniente de uma base composicional ou geracional  $Y$ , ela representa, em relação a  $Y$ , uma “novidade qualitativa”, possuindo, deste modo, um “estatuto ontológico próprio” (CORDOVIL, 2022, p. 148).

A base composicional  $Y$  – enquanto “fundamento ontológico” de  $y$  – é uma condição necessária para a emergência ontológica de  $y$ , mas o vir-a-ser de  $y$  modifica qualitativamente o cômputo geral da realidade, pois possui propriedades peculiares ausentes em  $Y$ . Por forçosa analogia, assumamos que o romance, em linguagem escrita, “Os Maias”, esse clássico da literatura universal, é a base composicional do qual o filme ou a série “Os Maias” emerge. O livro é necessário para que haja o filme, mas o filme possui novidades qualitativas múltiplas, de modo que sua ontologia é diferente daquela de seu campo geracional.  $Y \neq y$ .

Na ontologia emergentista, as entidades clássicas possuiriam propriedades, como posição, qualitativamente diferentes das propriedades das entidades quânticas, como entrelaçamento, emaranhamento, sobreposição, não-localidade. Logo, no ato de medida não haveria qualquer colapso de um nível de realidade em outro, não haveria a implosão ontológica da realidade quântica em realidade clássica. Cordovil aproxima o emergentismo do Realismo Estrutural Ontológico que assume que “as entidades quânticas têm uma natureza ontológica relacional”.

Ora, “o conjunto de relações que especificam a identidade das entidades quânticas” (CORDOVIL, 2022, p. 150), nos diz o autor, é distinto do “conjunto de relações que especificam as entidades clássicas”. Deste modo, medir não é colapsar a realidade quântica em realidade clássica, por meio de um processo abrupto, descontínuo e instantâneo, conforme o Axioma V de Jammer e a Mudança 1 de von Neumann. Medir é *trans*-formar, é promover um *vir-a-ser*, uma *genesis*, um surgimento, isto é, a emergência de novas entidades com propriedades qualitativamente novas.

## **Emergentismo e *devoir universal* na filosofia da mecânica quântica: Uma aproximação a partir de David Bohm**

Na ontologia quântica emergentista (EmQM) não há colapso da função de onda durante o evento de medição. O que há é a emergência de um estado físico novo, de natureza clássica, a partir de um estado físico quântico. O surgimento do novo, ou de estados físicos qualitativamente novos, a partir de outros estados físicos, poderia ser pensado como o resultante do que David Bohm chama de “devoir universal” em *Causalidade e acaso na física moderna* (BOHM, 1995, p. 292). O universo é um absoluto formado pela totalidade da matéria que está sempre em transformação. Disso resulta que o universo está de modo incessante a engendrar, ou gerar, indefinidamente, novos estados físicos:

Esse devoir universal, quantitativa e qualitativamente infinito, é muito complexo para se reverter por si só ou chegar a algum tipo de equilíbrio final. (...) A noção de infinidade qualitativa da natureza implica que o desenvolvimento do Universo no tempo levará a uma diversidade inexaurível de novas coisas (BOHM, 1995, p. 292-293).

Parece, à primeira vista, que Bohm opta por interpretar não somente a mecânica quântica, mas a física moderna em geral, a partir de uma metafísica mobilista, como a de Heráclito, do que de uma teoria parmenídico-platônica em se admite a unidade do ser. Não é o caso. A filosofia bohmiana conjuga o devoir heraclítico com a busca platônica pela “unidade” e o “absoluto”. É preciso, portanto, realizar a síntese:

Para observar o mundo existindo como uma unidade, devemos começar pela noção de que a realidade básica é a totalidade da matéria existente em processo de devir. É a realidade básica porque existe de maneira independente: nenhuma de suas características depende de nada que exista fora de si mesma, pois, por definição, a *totalidade* da matéria em processo de devir contém tudo o que existe (BOHM, 1995, p. 299).

Como em um jogo, parece mais uma vez que compreendemos a proposta de Bohm: é um materialista que defende que a realidade mais básica é material. No entanto, mais uma vez, o diagnóstico apressado nos trai. Mais fundamental do que as coisas materiais são suas “relações recíprocas”. “A totalidade da matéria em devir” é definida, portanto, pela “totalidade de suas relações” (BOHM, 1995, p. 300). As infinitas, e incompreensíveis possibilidades de novas



combinações e relações permite que novos sistemas físicos, originais tanto em suas propriedades quantitativas quanto em suas peculiaridades qualitativas, continuem surgindo uns dos outros.

Diante de tanta variedade, diversidade e complexidade, será preciso, sempre, investigar a natureza com o espírito de Planck: “sempre considere a busca do absoluto a mais nobre tarefa da ciência” (PLANCK, 2012: 37).

(...) admitimos que *há uma realidade objetiva, absoluta e única*. Para melhor conhecer essa realidade e eliminar algumas concepções e lacunas presentes em nosso conhecimento em alguma época particular, devemos continuar as pesquisas científicas para encontrar um número cada vez maior de coisas que permitam uma *análise aproximada da matéria em processo de devir*; estudar com uma aproximação cada vez maior as *relações entre essas coisas*; descobrir cada vez mais detalhadamente quais são os *limites de aplicação de cada conjunto específico de conceitos e de leis*. Eis, portanto, o caráter essencial da pesquisa científica: *mover-se na direção do absoluto, ao estudar o relativo* em sua diversidade e em sua multiplicidade inexaurível. (BOHM, 1995, p. 301-302. Grifos nossos).

Percorrendo a mesma senda, Bohm conjuga realismo e relacionalismo<sup>19</sup> com devir e busca do absoluto em uma cosmovisão que, ao que nos parece, pode ser convergente com o tipo de emergentismo discutido nesse trabalho<sup>20</sup>. Um dos mais antigos defensores de uma concepção emergentista na chamada Escola de Lisboa da mecânica quântica, o físico português José Croca, sinaliza para tal aproximação com Bohm em seu *Espaço e Tempo na física quântica: O Devir*:

O tempo, nesse sentido amplo do Devir, está relacionado sobretudo com a mudança, a alteração, a modificação, resultante das interações complexas relacionais, por isso é um conceito muito mais geral do que o conceito de “tempo cronológico”. Trata-se, portanto, de algo básico, de algo

---

<sup>19</sup> Uma ontologia física para o nível quântico representa uma ontologia dependente de medição, contextual ou relacional; ou seja, o avanço da “ontologia quântica”, como conceito científico, marca uma clara ruptura com as proposições ontológicas clássicas na forma de realismo direto ou ingênuo. De fato, essa abordagem ontológica é uma parte vital do legado de David Bohm. Ele observou que, nas teorias ontológicas clássicas da física, há uma tendência de presumir que os conceitos básicos da teoria correspondem a realidades existentes independentemente, ou seja, a realidades que não dependem do contexto ou de níveis mais profundos de existência. Por outro lado, em sua interpretação ontológica da teoria quântica, os conceitos básicos, como “partícula” ou “momentum”, refletem uma realidade que é inerentemente dependente do contexto ou de níveis mais profundos, ou de ambos (WALLECZEK; GRÖSSING; PYLKKÄNEN; HILEY, 2019, p. 7).

<sup>20</sup> Esperamos aprofundar, em pesquisas futuras, as relações de convergência e divergência entre a filosofia da física de Bohm, marcada por seu realismo relacional e pela ideia de totalidade em devir, com a ontologia emergentista e o realismo estrutural propostos por Cordovil (2022), e o papel do conceito de devir na ontologia da mecânica quântica desenvolvida por Croca (2002).

inerente à mudança, à alteração, à modificação de um determinado estado. Ainda mais, porque a própria definição de estado, de ente relacional implica essa mudança constante: o Devir. Assim, o conceito de Devir deve aqui ser entendido como algo que procura traduzir, descrever e eventualmente quantificar a permanente mudança, a que todos os entes naturais complexos estão sujeitos. Esta mudança, este Devir, resulta, em última análise da interação recíproca complexa dos entes físicos com o meio em que estão inseridos. David Bohm, no livro *“Wholeness and the Implicate Order”* (1983), desenvolve de uma forma bastante interessante e inovadora esta ideia da profunda interligação de todos os entes naturais (CROCA, 2022, p. 169-170).

Nesse trabalho Croca propõe que “o conceito ontológico mais básico é o Devir”. Ora, se a natureza última da realidade física, o nível ontológico fundamental, for o que Bohm chama de a “totalidade da matéria em processo de devir”, não é difícil conceber algo como um campo quântico – ou campo subquântico (CSQ) – onde entidades físicas emergem, como partículas elementares que são criadas e aniquiladas a todo momento. O próprio mundo quântico emergiria de tal campo tanto quanto o mundo clássico emerge dele. A realidade física, de modo ascendente, cada vez mais diversa, complexa e variada, criaria sistemas e subsistemas cujos domínios, qualitativa e quantitativamente mais amplos, ordenariam o cosmos, das mais diminutas “entidades” na escala de Planck aos maiores superaglomerados de galáxias do universo em larga escala, sem que as incontáveis “camadas” da realidade pudessem ser reduzidas umas às outras<sup>21</sup>.

## Considerações finais

Cordovil, propõe para o problema da medição, uma nova abordagem: “emergentista, relacional e transformacional”. Ao fazê-lo, se desvencilha da incômoda contradição entre o

---

<sup>21</sup> Contudo, não estou certo em que medida podemos combinar, de modo logicamente consistente e epistemologicamente “sólido”, a defesa de um “nível ontológico fundamental” com um programa emergentista em sentido forte. Talvez o que o emergentismo exija de seus proponentes, em último caso, seja o próprio abandono da ideia de que há uma hierarquia ontológica do real, em que um nível básico satisfaz a condição de “natureza última da realidade”. Nesse universo emergentista complexo, em que as camadas da realidade emergem umas das outras, todo nível ontológico seria fundamental, posto que irreduzível a outro. Mas, por outro lado, se um nível da realidade não é redutível a outro, tampouco pode ser considerado completamente independente daquele do qual emergiu. Ora, o mundo quântico pode não ser condição suficiente para entendermos a diversidade e a complexidade dos sistemas químicos, biológicos e psíquicos, mas é uma condição necessária para a existência dos mesmos. Desta forma, o conceito de “necessidade” é o que nos permitiria preservar a ideia de uma “realidade última” e fundamental de tal modo que poderíamos concordar que o nível ontológico mais básico não é aquele que explica todos os demais, mas aquele cuja existência é necessária para emergência de todos os níveis subsequentes?

postulado da universalidade da MQ e o colapso da função de onda. Se bem entendi a hipótese, é uma ótima “jogada”, no sentido de superar a dicotomia entre A e B como se tratasse, de fato, de um falso problema. Nem a MQ é uma descrição completa da realidade, pois possui uma ontologia própria, ao passo que os sistemas físicos clássicos são ontologicamente autônomos em relação a ela, e nem há “Colapso da Função de Onda”, por que o que ocorre na medição não é um ato de redução ontológica ou de seleção natural física, mas um evento de emergência de um sistema físico com suas propriedades específicas, tais como posição, isto é, localização, não-sobreposição etc.

Para Cordovil, combinando a ontologia emergentista com o Realismo Estrutural Ontológico, “as propriedades clássicas seriam atributos estruturais emergentes de redes macroestruturadas específicas, frutos de relações transformativas e interdependentes entre as partes do sistema integrado” (CORDOVIL, 2022, p. 153). A proposta parece arrojada e o programa de pesquisa promissor. Claramente, temos que nos questionar se a hipótese não seria mais uma solução lógico-semântica do que física para um problema mais físico do que lógico-semântico, embora tais dimensões estejam interligadas. Evidentemente, e o autor sabe se justificar, uma hipótese de trabalho não é uma tese final, em pleno grau de maturidade. Há trabalho e isso é bom. Uma questão que me parece fulcral e que deixo ao autor, é saber se a hipótese emergentista está a salvo do risco filosófico de substituirmos um problema por outro. Não poderíamos enfim perguntar “O que há, na natureza da medição, que desencadeia a emergência?”, o que gera, de fato, a emergência das novas entidades e suas propriedades? Se tais perguntas ou carecerem de sentido ou encontrarem boa resposta, quiçá o problema da medição poderá encontrar no emergentismo o caminho para sua solução.

## **Agradecimentos**

A Filipe Pamplona, do Centro de Filosofia da Ciência da Universidade de Lisboa, Portugal, pelo convite para comentar o artigo do professor Cordovil na abertura do *Seminário Physikós de Filosofia da Física e da Cosmologia* (2023). Ao professor Cordovil, pelo amigoso e prolífico

diálogo. Ao Centro de Filosofia da Ciência da Universidade de Lisboa pela grande colaboração no “Dossiê Filosofia da Física Vol. 1 e 2” e pelo apoio no Seminário *Physikós*. Aos demais colegas de *Physikós*-CNPq pelos debates construtivos e apontamentos enriquecedores.

### ***Post Scriptum* à guisa de explicação**

Entre 2022 e 2023 um grupo de pesquisadores de diversas instituições<sup>22</sup> organizou o “Dossiê Filosofia da Física” em dois volumes, pela *Revista Perspectiva da UFT*. A fecundidade de uma obra, cremos, se mede pela discussão que gera, pelos problemas que coloca, pelas soluções que propõe. O termômetro de tudo isso é o debate subsequente a sua publicação. Desde a publicação de “Filosofia da Física Vol 1 e Vol 2” os artigos tem sido objeto de prolíficas discussões em inúmeras oportunidades. Em uma delas, o grupo de pesquisa que coordenamos na UFMS, denominado *Physikós – Estudos de História e Filosofia da Física e da Cosmologia*, passou a organizar, desde maio de 2023, uma série de seminários em colaboração com o Centro de Filosofia da Ciência da Universidade de Lisboa (CFCUL) o Instituto de Filosofia da Universidade Nova de Lisboa (IFNOVA) e a Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da UERJ<sup>23</sup>. A cada seminário recebemos um convidado e, após sua apresentação, discutimos seu trabalho. Nosso primeiro convidado foi o professor Luís Cordovil, coordenador do CFCUL, que discorreu sobre *Para uma interpretação emergentista do problema da medição*, artigo publicado no volume 1 de “Filosofia da Física”. A mim, coube comentar o texto, demandando-me revisitar o artigo. O presente artigo deve ser lido como um desdobramento do “Seminário *Physikós* de Filosofia da Física e da Cosmologia” ministrado por Cordovil, e o seminário, por sua vez, como um produto direto do artigo publicado pelo autor no *Dossiê* organizado por *Perspectivas*.

---

<sup>22</sup> Eduardo Simões (UFT), Antonio Augusto Passos Videira (UERJ), Osvaldo Pessoa Jr. (USP), Maria de Paz (Universidade de Sevilha-Espanha) e Vinícius Carvalho da Silva (UFMS). Tais pesquisadores colaboram mutuamente em diversos grupos de pesquisa como LLC-UFT-CNPq - “Lógica, Linguagem e Ciência”, ECTS-UERJ - “Estudos Sociais e Conceituais de Ciência, Tecnologia e Sociedade” e *Physikós*-UFMS-CNPq - “Estudos em História e Filosofia da Física e da Cosmologia”.

<sup>23</sup> Aqui agradeço aos demais organizadores do Seminário. São eles Filipe Pamplona (CFCUL/*Physikós*-CNPq), David Monteiro de Souza Jr (InQui-UFMS/*Physikós*-CNPq), Rafael Veloso (UERJ/*Physikós*-CNPq) e Wigson Rafael da Costa (NOVA de Lisboa/*Physikós*-CNPq).

## Referências bibliográficas

- ASPECT, A. Closing the door on Einstein and Bohr's quantum debate. *Physics* 8, 123 (2015).
- ARAÚJO, J; CORDOVIL, J. L; CROCA, J; MOREIRA, R; SILVA, A, R. Ontologia de Fourier, análise local por onduletas e Física Quântica. In: FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., BROMBERG, JL., (Orgs.). *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011.
- ARTUSO, E.; MARIM, C. (2019) Comparação Estatística de Autovalores de um Operador de Schrödinger Perturbado. *Rev Bras Ensino Fís* [Internet]. 2020; 42: e20190259. Available from: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0259>
- BELL, J. S. (1964). "On the Einstein-Poldolsky-Rosen paradox". *Physics* Vol. 1, No. 3, pp. 195-290.
- BOHR, N. (1995). *Física atômica e conhecimento humano*. Ribeiro, V. (Trad). Rio de Janeiro: Contraponto.
- BORN, M. (1964 [1954]). The Statistical Interpretations of Quantum Mechanics. In *Nobel Lectures, Physics 1942-1962*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- BORN, M; AUGER, P; SCHRÖDINGER, E; HEISENBERG, W. (2000 [1958]). Problemas de Física Moderna. Guinsburg, G (Trad.). São Paulo: Perspectiva.
- CARUSO, F; OGURI, V. (2016). *Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos*. Rio de Janeiro: LTC.
- CORDOVIL, J. L. (2023). Para uma Interpretação Emergentista do Problema da Medição: Uma hipótese de trabalho. *Perspectivas*, 7(2), 139–155. <https://doi.org/10.20873/rpv7n2-47>
- CROCA, J, N, R. (2023). Espaço e Tempo na Física Quântica: O Devir. *Perspectivas*, 7(2), 156–173. <https://doi.org/10.20873/rpv7n2-48>
- DA COSTA ARAÚJO, R. P. (2023). Veiled reality and hylomorphic structure. *Perspectivas*, 8(1), 312–328. <https://doi.org/10.20873/rpv8n1-70>.
- DE BROGLIE, L *et al.* (1955). O futuro da física. In *Para além da ciência*. Porto: Livraria Tavares Martins
- EINSTEIN, A. (1999). *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Pereira, C. A. (Trad.). Rio de Janeiro: Contraponto.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. (2008). *A Evolução da Física*. Rebuá, G. (Trad). Rio de Janeiro: Zahar.
- EINSTEIN, A; PODOLSKY, B; ROSEN, N. (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" *Phys. Rev.* 47, 10, pp. 777–780.
- EVERETT, H. (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton NJ: Princeton University Press.

- FEYNMANN, R. (2005). *Física em 12 Lições*. Korytowski, I. Rio de Janeiro: Ediouro.
- JAMMER, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. Wiley-Interscience. New York.
- HEIDEGGER, M. (1973) Anaximando. In *Os Pensadores*. São Paulo: Abril Cultural.
- HEISENBERG, W. (1925) Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Z. Physik* 33, 879–893. <https://doi.org/10.1007/BF01328377>
- HEISENBERG, W. (1995). *Física e Filosofia*. Ferreira, J. L. (Trad.). Brasília: Ed. Universidade de Brasília.
- LADYMAN, J.; ROSS, D. (2007). *Everything must go: Metaphysics naturalized*. Oxford: Oxford University Press.
- MANČAL, T. Translation of Werner Heisenberg's Paper "Quantum-Theoretical Reinterpretation of Kinematic and Mechanical Relations" *Zeitschrift für Physik* 33, 1925, 879-893 into Czech language. arXiv:2108.03119 [physics.ed-ph]
- NEUMANN, J. Von. (1955) *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (Original work published 1932).
- NEUMANN, J. Von. (2018). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition* (Robert T. Beyer, Trans.). Princeton University Press. Princeton.
- LONDON, F.; BAUER, E. (1939). *La théorie de l'observation en mécanique quantique*. Paris: Hermann.
- FREIRE JUNIOR, O. Alain Aspect's experiments on Bell's theorem: a turning point in the history of the research on the foundations of quantum mechanics. *Eur. Phys. J. D* 76, 248 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-022-00542-z>
- PEREZ, J. F. (1995). Usando a representação de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 17. Nº 2.
- PESSOA JR., O. (2013) Emergência e redução: uma introdução histórica e filosófica. *Ciência e Cultura*; 65 (4), p. 22-26.
- PESSOA JR., O. (2011). O fenômeno cultural do misticismo quântico In *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*. In Freire JR, O., Pessoa JR, O., Bromberg, JL., (orgs). *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física.
- PLANCK, M. (1995). *Autobiografia científica e outros ensaios*. Trad. E. S. Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto.
- SANTOS, G. (2020). Integrated-structure emergence and its mechanistic explanation. *Synthese* 198: 8687-8711. <https://doi.org/10.1007/s11229-020-02594-3>.
- SANTOS, G. (2015). Ontological Emergence: How is that possible? Towards a new Relational Ontology. *Foundations of Science*, 20, p. 429-446.

- SCHRÖDINGER, E. (1926), Quantisierung als Eigenwertproblem. *Ann. Phys.*, 384, p. 361-376. <https://doi.org/10.1002/andp.19263840404>
- SCHRÖDINGER, E. (1965 [1933]). The Fundamental Idea of Wave Mechanics. In *Nobel Lectures, Physics 1922-1941*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- SCHRÖDINGER, E. (1996). *A Natureza e os Gregos seguido de Ciência e Humanismo*. Lisboa: Edições 70.
- SKLAR, L. (2021). *Filosofia da Física*. Trad. P. Galvão, P. Mateus e D. Murcho. Rio de Janeiro: Contraponto.
- SILVA, C, V. (2019). Formalização e axiomatização de provas ontológicas: Das conjecturas de Jeans e Schrödinger à formulação computacional de Benzmüller e Woltzenlogel Paleo da prova de Gödel. *Perspectivas*, 2(2), 83–113. <https://doi.org/10.20873/rpv2n2-30>
- SILVA, C, V. (2021). Filosofia Natural, Física Teórica e Metafísica: Da física dos filósofos antigos à filosofia dos físicos modernos. *Perspectivas*, 6(1), p. 274–297. <https://doi.org/10.20873/rpv6n1-97>
- SILVA, C, V. (2011). A Filosofia da Natureza de Erwin Schrödinger. *Ensaio Filosóficos*, Vol 4, pp. 167–184.
- SIMÕES, E. (2021) *A concepção física do mundo*. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- WALLECZEK, J.; GRÖSSING, G.; PYLKKÄNEN, P.; HILEY, B. (2019) Emergent Quantum Mechanics: David Bohm Centennial Perspectives. *Entropy*, 21, 113.
- WIGNER, E. (1995) *Philosophical Reflections and Synthese*. (The Collected Works of Eugene Wigner). New York: Springer.

Recebido em: 23-05-2024  
Aprovado em: 11-07-2024

### **Vinícius Carvalho da Silva**

Professor de Filosofia na FACH/UFMS onde coordena o Physikós -estudos em História e Filosofia da Física e da Cosmologia. É doutor em Filosofia da Ciência e Teoria do Conhecimento pela UERJ. É colaborador no International Masterclass Hand on Particle Physics no Departamento de Física Nuclear e Altas Energias do Instituto de Física da UERJ.