



Para uma interpretação emergentista do problema da medição: uma hipótese de trabalho

English english engiliss english engiliss english engiliss:
english engiliss english

DOI: 10.20873/rpv7n2-47

João Luís Cordovil
Orcid ID: 0000-0002-5832-306X
Email: jlcordovil@hotmail.com

Resumo

Como é bem sabido, o problema da medição é um problema antigo – talvez mesmo o único problema - da Mecânica Quântica ou, pelo menos, de sua interpretação. Grosso modo, o problema da medição surge da transição de um sistema em Mecânica Quântica de um estado de sobreposição para um estado bem definido. Ou seja, da transição de um sistema num estado “quântico” para um “estado clássico”. Como também é bem conhecido, várias são as tentativas de solução para o problema de medição. Apesar de existir uma vasta gama de opções, a maioria das soluções apresentadas assume o pressuposto que a Mecânica Quântica é aplicável, em princípio, universalmente; isto é, a todos sistemas físicos. No entanto, talvez possamos questionar essa suposição e talvez essa suposição seja o que torna o problema de medição problemático. Este artigo tem como objetivo i) analisar o pressuposto da universalidade da aplicabilidade da Mecânica Quântica e consequências para a formulação do problema da medição; ii) explorar a ideia de que as entidades clássicas não são ontologicamente redutíveis, mas emergentes de entidades quânticas.

Palavras-chave

Filosofia da Mecânica Quântica. O problema de medição. Emergência Ontológica. Realismo Estrutural Ontológico.

Abstract

As is well known, the measurement problem is an old problem – perhaps even the only problem – of Quantum Mechanics or, at least, of its interpretation. Roughly speaking, the measurement problem arises from the transition of a system in Quantum Mechanics from a superposition state to a well-defined state. That is, the transition from a system in a “quantum” state to a “classical state”. As is also well known, several attempts exist to solve the measurement problem. Although there is a wide range of options, most of the solutions presented assume that Quantum Mechanics is applicable, in principle, universally; that is, to all physical systems. However, perhaps we can question this assumption, and maybe this assumption is what makes the measurement problem problematic in the first place. This article aims to i) analyze the assumption of the

universality of the applicability of Quantum Mechanics and consequences for the formulation of the measurement problem; ii) explore the idea that classical entities are not ontologically reducible, but emergent from quantum entities.

Keywords

Measurement Problem. Quantum Mechanics. Emergence

1. O problema de medição

As formulações usuais da Mecânica Quântica (MQ) não-relativista seguem geralmente (BÄCHTOLD, 2008), a chamada axiomatização de Dirac-von Neumann (DIRAC, 1930; VON NEUMANN, 1932, 2018). Existem na literatura várias apresentações da axiomatização da MQ. Não existe, contudo, uma forma canónica para a apresentação desta axiomatização, variando tanto no seu número de postulados, como no formalismo apresentado. Para efeitos deste artigo usaremos, por exemplo, a axiomatização da MQ que nos surge em Jammer (1974: 5), sendo que as conclusões deste texto pretendem ser independentes da axiomatização particular da MQ usada:

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

Axiom II. To every observable \mathbf{P} corresponds uniquely a self-adjoint operator A action in \mathbf{H} .

Axiom III. For a system in state φ , the probability $\text{prob}_A(\lambda_1, \lambda_2 | \varphi)$ that the result of a measurement of the observable \mathbf{P} , represented by A , lies between λ_1 and λ_2 is given by $\| (E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})\varphi \|^2$, where E_λ is the resolution of the identity belonging to A .

Axiom IV. The time development of the state vector φ 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 2π .

- 1) Axiom V. If the measurement of the observable \mathbf{P} , represented by A , yields a result between λ_1 and λ_2 , then the state of the system immediately after the measurement is an eigenfunction of $(E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})$. (JAMMER, 1975: 5)¹

¹ "Axioma I. A cada sistema corresponde um espaço de Hilbert \mathbf{H} cujos vectores (vectores de estado, funções de onda) descrevem completamente os estados do sistema.

Axioma II. A cada observável \mathbf{P} corresponde unicamente um operador autoadjunto A atuando em \mathbf{H} .

Pode-se dizer – tal como o faz, Jammer - que a axiomatização é composta por duas partes: a primeira parte, constituída pelos primeiros quatro axiomas (ou postulado), que estabelecem, no fundo, o núcleo duro da axiomatização da teoria.

Ainda seguindo Jammer, os Axiomas I e II estabelecem a correspondência entre o formalismo e as noções primitivas de estado e de observável. O primeiro faz corresponder o estado de um sistema a uma função de onda ou a um vector de estado num espaço vectorial complexo (de Hilbert), afirmando suplementarmente que a função de onda ou vector de estado descrevem completamente o sistema; isto é, que a MQ é completa. O segundo axioma faz corresponder a noção de observável a um operador.

O axioma III estabelece a regra de Born, fazendo corresponder igualmente o formalismo com os resultados possíveis de uma medição.

O axioma IV determina que os sistemas evoluem deterministicamente de acordo com equação de Schrödinger, que é uma equação linear e que serve de equação de dinâmica da teoria – característica das teorias em física.

Portanto, dos postulados I-IV teríamos boa parte dos ingredientes para a constituição da teoria: como descrever inteiramente o sistema físico e como este evolui. Existem, aliás, algumas exposições da MQ que apresentam apenas quatros axiomas/postulados (ou seus equivalentes) como os suficientes para a descrição da teoria, ou da “receita”².

De acordo com a primeira parte da axiomática (axiomas I a IV), os sistemas quânticos estão, em geral, em um estado de sobreposição. Esta é, aliás, a característica fundamental para Dirac (1930:14) dos sistemas quânticos. Contudo, em geral, os sistemas após uma medição estão num estado bem definido da grandeza medida (e, como tal, não estão em sobreposição de

Axioma III. Para um sistema no estado φ , a probabilidade $\text{prob}_A(\lambda_1, \lambda_2 | \varphi)$ que o resultado de uma medição do observável \mathbf{P} , representado por A , se encontre entre λ_1 e λ_2 , é dada por $\| (E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})\varphi \|^2$, onde E_λ é a resolução de identidade pertencente a A .

Axioma IV. O desenvolvimento temporal do vector de estado φ é determinado pela equação $H\varphi = i\hbar\partial\varphi/\partial t$ (equação de Schrödinger) onde o hamiltoniano H é o operador evolução e \hbar é a constante de Planck dividido por 2π .

Axioma V. Se a medição de um observável \mathbf{P} , representado por A tiver um resultado dentro do intervalo entre λ_1 e λ_2 , então o estado do sistema imediatamente após uma medição é uma função própria de $(E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})$ (tradução do autor)

² Cf. por exemplo: Shankar, R. (1994) ou Susskind, L. and Friedman (2014)

estados). Assim, na segunda parte da MQ o axioma V surge como regra de transformação do conjunto de postulados anteriores para o caso específico em que sucede uma medição. Ou seja, da primeira para a segunda parte, ocorre um salto, na formulação de Dirac (1930: 36), ou um "colapso" da função de onda em um estado bem definido, ou uma projeção do vetor de estado. Este postulado de redução ou projeção – o axioma V - assume que, como resultado de um processo de medição, existe uma transição, instantânea, irreversível e não-linear, de todos os estados de probabilidade em sobreposição para o estado unitário que é o resultado da medição.

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 de 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.

Na literatura, podemos encontrar várias maneiras de formular o problema de medição. Segundo Ladyman e Ross (2007: 180-181) e Maudlin (1995) (no caso será o que designa por "The problem of outcomes":7), o problema de medição pode ser apresentado como um trilema, tal como o seguinte:

- 1) All measurements have unique outcomes
- 2) The quantum mechanical description of reality is complete
- 3) The only time evolution for quantum systems is in accordance with the Schrödinger equation

The problem is that Quantum Mechanics often attributes to quantum objects superpositions with respect to properties that we can measure. [...] We don't seem to observe superpositions of macroscopic objects like measurement devices contradicting (1), and so we have a problem if we continue to assume that the particle and the apparatus really don't have definite states in accordance with (2), and that the time evolution is always in accordance with (3). (LADYMAN and ROSS, 2007: 180-181)

Ainda seguindo Ladyman and Ross, o problema consiste no facto que, supostamente, estas três proposições, verdadeiras para a MQ serem incoerentes entre si. Ou dito de outro modo, existe como uma tensão interna entre os axiomas I-IV e o axioma V. Por um lado, segundo os axiomas I-III a MQ dá-nos uma descrição completa da realidade física, nomeadamente, a função-de-onda especifica todas as propriedades físicas do sistema. Segundo o axioma IV, A função-de-onda evolui de acordo com uma equação dinâmica linear (equação de Schrödinger). Daqui resulta que, em geral, que os sistemas quânticos são descritos como estando em superposições das propriedades que podemos medir (os observáveis). Contudo, todas as medições têm resultados bem determinados – resultado da medição - Axioma V. Mais especificamente, os sistemas macroscópicos, tal como os dispositivos de medição, não são observados em estados de sobreposição, o que contradiz (1) e (2) – se for pressuposto, tal como é o caso, que a MQ é aplicável a entidades macroscópicos.

Outra forma de colocar o problema de medição, que encontramos em Myrvold (2018):

If quantum theory is meant to be (in principle) a universal theory, it should be applicable, in principle, to all physical systems, including systems as large and complicated as our experimental apparatus. It is easy to show that linear evolution of quantum states, when applied to macroscopic objects, will routinely lead to superpositions of macroscopically distinct states.

Contudo,

If we take the quantum state to be a complete description of the system, then the state is, contrary to what would antecedently expect, not a state corresponding to a unique, definite outcome. (MYRVOLD, 2018)

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?

Por sua vez (OSVALDO PESSOA JR., 2003: 57-59) o problema poderia ser dividido em duas outras subquestões: i) poderia a MQ explicar, por si, esta transição sem necessitar do expediente do Axioma V? Se sim, então deixaria de existir a tensão entre os Axiomas da MQ que leva ao problema da medição. Se não então: ii) o que caracteriza uma medição? O que sucede numa medição que leva à transição dos Axiomas I-IV para o Axioma V?

2. Enfrentando o Problema da Medição

Uma das primeiras abordagens ao problema da medição pode ser encontrada nos últimos dois capítulos do trabalho de axiomatização da MQ de Von Neumann (1932, 2018). Neste texto Von Neumann rejeita a distinção entre objetos quânticos e clássicos, argumentando que o dispositivo de medição macroscópico também deve ser descrito como um sistema quântico (JAMMER, 1974: 475). Como tal, o sistema considerado em evolução não pode ser o sistema quântico objecto da medição isoladamente, mas o sistema entrelaçado O+M, entre o objeto quântico medido (O) e o dispositivo de medição (M). Seria para este que a MQ deve fornecer uma descrição completa de sua evolução. Contudo, é aqui que somos levados ao problema da medição. Se este sistema, por sua vez, fosse medido por outro dispositivo de medição (M2), atendendo que os estados deste seriam igualmente descritos pela MQ, então teríamos agora o sistema O+M+M2, e apenas retornaríamos à situação inicial, mas agora com três subsistemas. Portanto, desta forma, entraríamos numa cadeia infinita e nunca existia um estado definido como resultado da medição.³ No entanto temos estados definidos de medição. Então, o postulado do colapso seria necessário. Mas como o explicar?

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, 1932, 2018: 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. Ou seja, uma medição exige um sistema

³ Conferir igualmente Wigner (1961: 176). Agradeço ao revisor a sugestão.

observado, que pode incluir o aparato de medição, mas exige igualmente um observador que nunca poderá ser descrito pela física. Nesse sentido, como Jammer indica (JAMMER, 1975: 481-2), Von Neumann é levado a considerar que a transformação irreversível do estado do sistema medido seria devido à consciência do observador, pois seria a consciência do observado que permitiria cortar a cadeia de dispositivos de medição que são medidos sucessivamente. Em última análise, seria a consciência do sujeito da medição que levaria ao colapso da função de onda. Portanto, ao rejeitar-se o dualismo clássico-quântico é-se levado em direção a um dualismo físico-mental.

Voltando ao trilema que caracteriza o Problema da Medição:

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

Na literatura, as soluções do problema da medição passam, usualmente, pela negação de um dos três pressupostos acima.

Em Everett encontramos a negação de 1). A tese fundamental dessa interpretação é que, tal como na descrição de von Neumann, todos os sistemas físicos presentes numa medição - sistema medido (O), sistema medidor (M), observadores (Ob), ambiente (A) - estão todos entrelaçados, formando o sistema $O+M+Ob+A$. Contudo, no acto da medição, todos os estados possíveis de resultarem de uma medição são realizados. A vantagem dessa interpretação da Mecânica Quântica é que não há colapso. No entanto, o preço a pagar é aceitar a que todos estados possíveis de serem resultados de uma medição de um dado observável são igualmente reais, ficando por esclarecer como tal é possível a cada medição e como o compatibilizar a atribuição de probabilidades correspondentes a cada estado possível.

Uma outra resposta é rejeitar 2) - A descrição da mecânica quântica da realidade é completa. Esta é usualmente a via da teoria De Broglie-Bohm ou chamada Mecânica Bohmiana. Aqui

- contra a MQ - os sistemas quânticos teriam sempre pelo menos uma propriedade num estado bem definido. Em geral essa propriedade é a posição, com o argumento que todas as medições são, directamente, apenas e só medições da posição. Em diferentes formulações e em diferentes momentos, esta é a opção de De Broglie and Andrade e Silva (1971), Bohm (1951), Esfeld and Deckert (2017). Essas teses implicam que a função de onda não define completamente o estado de um sistema quântico. A MQ não descreve inteiramente os sistemas quânticos e o postulado do colapso reflete apenas a insuficiência da Mecânica Quântica.

Por fim, poderíamos rejeitar 3). Podemos defender que não há um colapso abrupto da função de onda, mas um colapso suave devido a um processo físico contínuo. Isso requer a modificação da dinâmica da MQ, da equação Schrödinger, para dar conta do colapso da função-de-onda nas circunstâncias apropriadas (GHIRARDI, RIMINI e WEBER, 1986). Ainda assim haveria um colapso. A mais conhecida dessa abordagem é a chamada interpretação GRW (GHIRARDI, RIMINI e WEBER, 1986) da MQ. Como é sabido existem várias subvariantes da GRW. Talvez a mais conhecida seja as GRW combinado com a hipótese que o colapso ocorra espontaneamente (GHIRARDI *et al.*, 1990). A ideia geral que motiva as GRW do colapso é que a função de onda do sistema quântico colapsa aleatoriamente sem necessidade de um sistema medidor e, deste modo, uma partícula se tornaria espontaneamente localizada.

Estas abordagens fazem parte da família de propostas onde se defende um realismo da função-de-onda (NEY, 2021). 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.

3. Sobre o pressuposto da universibilidade da MQ

Na digressão rápida pelas soluções principais presentes na literatura poderíamos agrupá-las entre aquelas que defendem que as entidades quânticas devem ser descritas em função das propriedades clássicas - seja a posição/corpúsculo, sejam ondas e as propriedades - e entre aquelas que defendem que as entidades macroscópicas/clássicas devem ser descritas em função das propriedades quânticas. Ou seja, ora existe uma prioridade ontológica dada às

propriedades clássicas (ou macroscópicas) ou ora existe uma prioridade ontológica às propriedades quânticas. Por prioridade ontológica entendo uma relação assimétrica em que as propriedades ontologicamente prioritárias são as reais enquanto as menos prioritárias são derivadas ou explicáveis em função das prioritárias.

Isto é, a grande maioria das interpretações da MQ são na realidade propostas de cariz reducionistas. Nomeadamente, micro-reducionistas ou macro-reducionistas. Quer isto dizer, as alternativas parecem oscilar entre aceitar de início que as propriedades e factos do todo – em particular, os objectos macroscópicos – são explicáveis em função da composição ou organização das propriedades intrínsecas das partes; ou que as propriedades das partes – em particular, os objectos quânticos – são explicáveis em função das propriedades intrínsecas do todo, isto é, as propriedades físicas dos objectos macroscópicos, por exemplo, tal como sucede na família de propostas na Mecânica Bohmiana. Por propriedades intrínsecas estou a entender o conjunto de propriedades que uma entidade instância independentemente da existência de outras entidades (ver Langton e Lewis (1998), Lewis (2001)). Por serem intrínsecas, essas propriedades são imutáveis e independentes de qualquer contexto relacional.

Isto é, apesar da sua diversidade e longa literatura, a grande maioria das abordagens assume que a MQ é uma teoria universal, é uma teoria que deveria ser aplicável a todos objectos físicos, ficando apenas em discussão se a prioridade deve ser dada as propriedades quânticas ou às propriedades clássicas e qual o mecanismo que caracteriza a medição. Recorde-se como Ladyman and Ross ou Myrvold apresentam o problema da medição: “If quantum theory is meant to be (in principle) a universal theory, it should be applicable, in principle, to all physical systems”.

A suposição de que as propriedades do nível composicional superior são supervenientes, redutíveis ou idênticas às propriedades do nível fundamental (aquelas que são o objeto de teorias físicas fundamentais) é clara na axiomatização de von Neumann-Dirac e na maior parte do debate da MQ sobre o problema da medição. É uma herança atomística supor que as teorias físicas fundamentais - isto é, teorias sobre as entidades mais simples mereológicas - se aplicam a todos os domínios físicos, ou que, em princípio, toda a realidade física é descrita pela física

fundamental. Contudo, poder-se-ia dizer que este é precisamente o cerne do problema de medição: nem as propriedades clássicas não parecem redutíveis a propriedades quânticas, nem as propriedades quânticas parecem redutíveis às propriedades clássicas.

Assim sendo, o problema da medição poder-se-ia dizer que é a consequência da impossibilidade de uma redução clássico-quântico e quântico-clássico. Ninguém – tirando, eventualmente, Bohr - parece considerar que o postulado do colapso é necessário porque quântico e clássico e dois domínios ontológicos distintos. Embora no caso de Bohr e, por extensão, da chamada interpretação ortodoxa da MQ, a questão não será ao nível ontológico, mas ao nível da necessidade da utilização de conceitos clássicos na descrição dos fenómenos físicos e, em particular, de medições. Quer isto dizer que o problema da medição poderia ser consequência, em parte da rejeição da interpretação ortodoxa da MQ, e em especial do pressuposto reducionista da Física e que é estabelecido na pressuposição que a MQ é universalmente aplicável. No entanto, por que deveríamos supor que todos os domínios físicos da realidade são redutíveis a um outro? Por que não consideramos a possibilidade de que os objetos clássicos tenham (algumas) propriedades ontologicamente distintas dos objetos quânticos? Ou seja, por que não considerar a possibilidade de os objetos clássicos terem propriedades distintas e autónomas das propriedades dos objetos quânticos. Isto é, não seria possível abordar o problema da medição cruzando-o com a hipótese da emergência ontológica?

4. Uma solução emergentista para o problema da medição?

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 *et al.*, 2022; SANTOS, 2015). Neste sentido, a propriedade, comportamento ou lei emergente representa uma novidade qualitativa relativamente à sua base composicional ou geracional. Como tal, o emergente tem um estatuto ontológico próprio. Contudo, a sua existência depende da sua base composicional ou geracional.

Assim, a entidade emergente é parcialmente dependente - é dependente das entidades base - e parcialmente independente - é nova e ontologicamente autónoma relativamente à sua base.

Portanto, podemos considerar a possibilidade de que os objetos quânticos não compartilham a mesma natureza ontológica que os objectos clássicos, considerando que pelo menos uma das propriedades, comportamentos ou leis que caracterizam as entidades clássicas não é produzida ou determinada pela simples organização aditiva ou combinação das entidades quânticas - isto é, haveria pelo menos uma propriedade, comportamento ou lei qualitativamente nova e ontologicamente autónoma ao nível das entidades clássicas. Assim sendo, poderíamos aceitar que os objetos quânticos não têm, de facto, nem posição, nem trajetória, nem *momentum*, tal como parece ser a leitura mais directa da MQ. Posição, por exemplo, poderiam ser consideradas como uma propriedade emergente das entidades clássicas. Em particular, do todo composicional entidade quântica objecto da medida e objecto clássico medidor. A hipótese de incluir a emergência ontológica na relação inter-nivelar em física, no fundo já sucede no debate contemporâneo sobre a Gravitação Quântica e a emergência do Espaço-tempo a partir de uma estrutura não espacial, nem temporal (p.e. conferir Crowther (2021) ou Le Bihan (2021)).

É possível argumentar, tal como se argumentou contra a interpretação de Bohr e que deu origem ao problema da medição, que a MQ não contém nenhum critério preciso para identificar a fronteira entre micro e macro ou entre quântico e clássico. Que não há nada na MQ que fixe tal limite. Contudo, considerando, por um lado, a hipótese que as entidades clássicas não compartilham o mesmo conjunto de propriedades das entidades quânticas, então torna-se evidente que a MQ não pode ser aplicado a entidades clássicas e, portanto, não é surpreendente que a MQ não fixe tal limite. Sai fora do seu domínio de aplicabilidade. Seria como perguntar onde estaria o limite fixo entre as propriedades quânticas e as propriedades biológicas, se estas últimas não forem ontologicamente redutíveis às primeiras.

Por outro lado, o limite quântico-clássico não seria estabelecido numa escala específica, pois a distinção entre domínios não seria ao nível da escala, mas de propriedades e de leis. Ou seja, se as entidades clássicas são emergentes relativamente às entidades quânticas, então a

distinção entre quântico e clássico (que será ontológica) não é idêntica à distinção entre macro e micro (que será uma distinção fenomenológica).

Por fim, podemos supor, tal como no Realismo Estrutural Ontológico (REO) (LADYMAN and ROSS, 2007; FRENCH, 2014; ESFELD, 2014), que as entidades quânticas têm uma natureza ontológica relacional. Isto é, não possuem propriedades intrínsecas. Em particular, poderemos dizer que uma das propriedades identitárias das entidades quânticas é a propriedade relacional de emaranhamento/entrelaçamento, propriedade que as distingue das entidades clássicas. Assim sendo, podemos então pensar que uma entidade quântica, quando medido, apresentará um carácter corpuscular, mesmo que essa não seja a sua natureza, pois medir acarretaria o estabelecer de uma relação (de localização) com dispositivo de medição, implicando igualmente uma semelhança entre o dispositivo de medição e o objecto de medição. Ou seja, em essência, uma medição, não seria, não é, um acto de revelação do estado de uma dada propriedade, mas é o estabelecer de uma relação que, no caso das entidades quânticas, é, também, um acto de transformação da realidade física. Medir é transformar. Tal é, de resto, uma característica semelhante a outras interpretações da MQ (LAZAROVICI, OLDOFREDI and ESFELD, 2018: 126).

Assim, dentro desta hipótese de trabalho, numa medição há uma mudança qualitativa das entidades quânticas dada pela emergência de, pelo menos, uma propriedade nova e autónoma. Ou dito de outro modo, tomando como hipótese o REO na sua essência – que a realidade física é constituída por estruturas relacionais, então o conjunto de relações que especificam a identidade das entidades quânticas (p.e. a relação de emaranhamento/entrelaçamento) é distinta do conjunto de relações que especificam a identidade das entidades clássicas. Se os aparelhos de medida são, em geral, entidades clássicas e se estas forem caracterizadas pela propriedade de estarem numa posição específica, então medir é de estabelecer relações de localização. Como tal o resultado da medição será expresso em termos de posição, pois ser medido seria integrar uma estrutura relacional de localização. Nomeadamente, uma vez que o sistema de medição é caracterizado por ter a propriedade de posição enquanto propriedade emergente da estrutura relacional dos seus relata, isto é, da sua composição, então qualquer sistema só pode ser um *relatum* da relação de medição se sofrer uma mudança qualitativa da qual

emerge a propriedade de posição. Medir é relacionar transformando qualitativamente a entidade quântica em entidade clássica por integração de uma propriedade emergente.

Por outro lado, esta proposta ontológica compreenderia, eventualmente, o papel da decoerência como a interação entre a estrutura relacional da entidade quântica e o ambiente (e/ou o aparelho de medida). No caso da decoerência, uma medição de um sistema quântico é caracterizada por um processo físico de interação rápida, mas contínua entre o objeto de medição, o "ambiente" e, eventualmente, o sistema medidor, de tal forma que as interações ambientais suprimem a sobreposição de estados levando a transformação do estado de sobreposição quântica num estado clássico. O ambiente estaria continuamente a "medir" alguma quantidade, agindo como um aparelho de medição. No fundo, o que se tem aqui é a ideia que sistemas quânticos convergem para sistemas clássicos no limite em que o sistema quântico é composto por muitas (tendendo para infinito) partículas (o ambiente). No entanto, ao contrário de resolver o problema da medição, só o piora (LANDSMAN, 2007) pois levaria um novo trilema (BACCIAGALUPPI, 2020): ou o ambiente, não importa quão complexo possa ser, é apenas outro sistema quântico, sendo a aproximação referida acima é assintótica, e, como tal, problema se mantém; ou será necessário introduzir um parâmetro "ambiente" - uma variável física externa à MQ, uma variável oculta - de forma a evitar que o ambiente esteja igualmente em sobreposição; ou é necessário alterar a equação de Schrödinger para dar conta que na interação de muitas partículas. Portanto, a decoerência, por si só, como é bem sabido, não fornece uma solução para o problema de medição. Contudo, pode ser combinada com várias interpretações da MQ.

Tomando as entidades quânticas, tal como as entidades clássicas, como estruturas relacionais transformativas, então seria natural - tal como é a principal tese da decoerência - que os sistemas quânticos estão, em geral, em todo o momento, em relação com o seu ambiente e como tal devem ser tratados como sistemas abertos. Dito de outro modo, se a realidade é composta por estruturas relacionais interdependentes, então todos os sistemas são abertos. Por outro lado, como ambos - clássico e quântico - compartilhariam a mesma natureza ontológica relacional - mas diferindo nas suas propriedades relacionais específicas, nomeadamente existindo pelo menos uma propriedade relacional ontologicamente emergente no primeiro

relativamente ao segundo, então existiria uma distinção real entre quântico-clássico, uma distinção real entre quântico e aparelho de medida e/ou com o ambiente. Como tal, poder-se-ia pensar a decoerência como a descrição da interação entre os sistemas relacionais que leva à transformação da entidade quântica em entidade clássica.

Claro que esta é apenas uma hipótese de trabalho. Uma tese a ser desenvolvida no futuro; não é ainda uma proposta de uma ontologia completa e desenvolvida. Há muitas questões a pensar, detalhes a trabalhar, clarificações a fazer. No entanto, se as hipóteses que apresentei podem ser, de algum modo, válidas, então, por um lado, o problema da medição poderia ter uma nova abordagem: emergentista, relacional e transformacional.⁴ Uma abordagem onde não seria problemático considerar que os objetos quânticos têm a propriedade relacional de emaranhamento/entrelaçamento e os objetos clássicos a propriedade relacional de posição. São propriedades que os conectam, mas que os distinguem. Uma abordagem que não implica a alteração ou a rejeição da MQ. Uma abordagem, por fim, onde evitar-se-ia aceitar o pressuposto que as propriedades dos objetos clássicos são idênticas ou redutíveis a propriedades quânticas, pressuposto que nos leva ao problema da medição. Tomemos essa suposição por aquilo que será: uma herança da metafísica tradicional de objectos da física clássica – isto é, do atomismo e dos seus esquemas reducionistas.

Conclusão

O problema da medição é, usualmente, colocado como um trilema. Este trilema tem, no entanto, como pressuposto que a MQ é uma teoria aplicável universalmente. Isto é, a MQ é, em princípio, aplicável a todos sistemas físicos. Se considerarmos que uma medição é uma interação física, então a MQ deveria explicar e descrever o processo de medição, contudo tal não sucede. Podemos, contudo, rejeitar a aplicabilidade universal da MQ a todos sistemas físicos, defendendo que ao chamado nível clássico existem propriedades emergentes, em sentido ontológico, relativamente ao chamado nível quântico. Um debate que, diga-se, que é semelhante

⁴ A articulação entre estas três teses metafísicas, embora não no contexto do problema da medição, já se mostrou ser possível em Cordovil *et al.* (2022) e Santos (2015, 2021).

ao que já sucede em Química (cf. por exemplo: Hendry (2019)) onde alguns autores defendem que a estrutura espacial molecular é ontologicamente emergente relativamente à sua base composicional – as entidades quânticas.

A explicação da emergência de propriedades clássicas, tais como a posição, através de uma medição (com um aparelho ou com o ambiente) poderia ser dada pela natureza estrutural-relacional das entidades físicas. Adota-se aqui uma abordagem próxima do REO. Mais precisamente, articulando o REO com a caracterização da emergência relacional-transformativa inter-nívelar desenvolvida em Santos (2015; 2021). Nesta perspetiva, o REO poderia ser compatível com a ideia da emergência de novas propriedades de nível superior estrutural através da transformação qualitativa das sub-estruturas. Abraçando essa visão estrutural-relacional transformacional, pode-se argumentar que uma dada estrutura pode instanciar um novo tipo de propriedade que não se manifesta no nível dos componentes da estrutura. O surgimento de uma nova propriedade, em virtude de uma medição, poderia ser feito em virtude de uma mudança qualitativa ao nível das entidades quânticas como *relata* da relação que compõem a estrutura, nomeadamente sistema quântico-sistema clássico (medidor). As propriedades clássicas seriam atributos estruturais emergentes de redes macroestruturadas específicas, fruto de relações transformativas e interdependentes entre as partes do sistema integrado, seja este o sistema medidor ou o sistema medidor+sistema medido. É por isso que as estruturas entre sistemas quânticos-clássicos não podem ser explicadas como somas lineares das suas partes, como se fossem entidades essencialmente independentes e imutáveis. Do ponto de vista físico, tal como sucede com outras interpretações da MQ, o processo de emergência poderia ser descrito pela decoerência e sem necessidade de alterar a equação de Schrödinger.

Assim, se esta hipótese de trabalho – interpretação emergentista, relacional e transformacional – tiver alguma validade, considerando que é, para já, apenas uma hipótese de trabalho faltando ainda atender e explicar muitos aspetos da MQ, estaria aberta a possibilidade de defender-se simultaneamente as três proposições do que caracterizam o problema da medição, sem que levasse a uma contradição. Não teríamos de rejeitar nenhum dos postulados da MQ,

atitude que parece ser a empiricamente mais recomendável, mas apenas rejeitar o pressuposto da universalidade da aplicação da MQ.

Reconhecimentos

Agradeço o apoio financeiro da FCT, 'Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP no âmbito do Estímulo ao Emprego Científico - DL57 / 2016 / CP1479 / CT0065.

Referências

- Bächtold, M. (2008). Five Formulations of the Quantum Measurement Problem in the Frame of the Standard Interpretation. *J Gen Philos Sci*, **39**: 17-33.
- Bacciagaluppi, G. (2020). The Role of Decoherence in Quantum Mechanics. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020 Edition), Edward N. Zalta (ed.).
- Bohm, D. (1951). *Quantum Theory*. Prentice-Hall. New Jersey.
- Cordovil, J.L., Santos, G.C. & Symons, J. Reconciling Ontic Structural Realism and Ontological Emergence. *Found Sci* (2022)
- Crowther, K. As below, so before: 'synchronic' and 'diachronic' conceptions of spacetime emergence. *Synthese* **198**, 7279–7307 (2021)
- De Broglie, L. and Andrade e Silva, J.L. (1971). *La Réinterprétation de la Mécanique Ondulatoire*. Gauthier-Villards. Paris.
- Dirac, P. A. M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. Oxford University Press. Oxford.
- Esfeld, M. (2014). "The primitive ontology of quantum physics: Guidelines for an assessment of the proposals", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **47** (2014): 99–106
- Esfeld, Michael & Deckert, Dirk-Andre (2017). *A Minimalist Ontology of the Natural World*. Routledge.
- French, S. (2014). *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford University Press. Oxford.
- Ghirardi, G.C., Rimini, A., e Weber, T. (1986). Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, **34**: 470-91.
- Ghirardi, G.C., Grassi, R. & Pearle (1990), P. Relativistic dynamical reduction models: General framework and examples. *Found Phys* **20**, 1271–1316 (1990). <https://doi.org/10.1007/BF01883487>
- Hendry, Robin 2019, "Emergence in Chemistry: Substance and Structure", in S. Gibb, R. Hendry, and T. Lancaster (eds.), *The Routledge Handbook of Emergence*, Abingdon: Routledge, 339–351.
- Jammer, Max. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. Wiley-Interscience. New York.
- Landsman, N. (2007). Between classical and quantum. *Handbook of the Philosophy of Science* **2**:417-553
- Ladyman, J. and Ross, D. (2007). *Everything must go: Metaphysics naturalized*. Oxford University Press. Oxford.

- Langton, R. and Lewis, D. (1998). Defining Intrinsic. *Philosophy and Phenomenological Research*, **58**: 333-345.
- Lazarovici, D., Oldofredi, A. and Esfeld, M. (2018). Observables and Unobservables in Quantum Mechanics: How the No-Hidden-Variables Theorems Support the Bohmian Particle Ontology. *Entropy* 2018, **20**, 381: 116-132.
- Le Bihan, B. Spacetime emergence in quantum gravity: functionalism and the hard problem. *Synthese* **199**, 371–393 (2021).
- Lewis, D. (2001). Redefining 'Intrinsic'. *Philosophy and Phenomenological Research*, **63**: 381-398.
- Lewis, D. (1986). *On the Plurality of Worlds*. Blackwell. Oxford.
- Maudlin, T (1995). Three measurement problems. *Topoi* **14**: 7–15 (1995).
- Myrvold, Wayne. (2018). Philosophical Issues in Quantum Theory. In: Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Neumann, J. Von. (2018). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: new Edition* (Robert T. Beyer, Trans.). Princeton University Press. Princeton (Original work published 1932).
- Ney, A. (2021). *The World in the Wave Function*. OUP. Oxford
- Pessoa, Osvaldo Jr. (2003). *Conceitos de Física Quântica*. Livraria da Física. São Paulo
- Santos, G. (2015). Ontological Emergence: How is that possible? Towards a new Relational Ontology. *Foundations of Science*, **20**: 429-446.
- Santos, G. (2020). Integrated-structure emergence and its mechanistic explanation. *Synthese* **198**: 8687-8711. <https://doi.org/10.1007/s11229-020-02594-3>.
- Shankar, R (1994). *Principles of Quantum Mechanics* (2ed.). Springer. New York, NY.
- Susskind, L. and Friedman (2014). *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*. Allen Lane. New York, NY.
- Wigner, E. (1961): "Remarks on the Mind-Body Problem", in *The Scientist Speculates*, I. J. Good, ed.: 284-302, Heinemann, London (1961); Basic Books, New York (1962).

Recebido em: 30/05/2022
Aprovado em: 12/10/2022

João Luís Cordovil

Doutorado em História e Filosofia das Ciências é, actualmente, Coordenador Científico do Centro de Filosofia das Ciências da Universidade de Lisboa, Investigador Responsável do mesmo e investigador contratado do Departamento de História e Filosofias das Ciências da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É igualmente docente no Minor, no Mestrado e no Doutoramento em História e Filosofia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A sua investigação tem-se centrado principalmente nas áreas da Filosofia da Física, da Metafísica da Ciência e da Ciência e Arte.