

Questões sobre aspectos históricos, matemáticos e filosóficos da mecânica quântica

(Notas de aula, outubro de 2020. © S. S. Chibeni)

Silvio Seno Chibeni

Departamento de Filosofia e Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Unicamp, www.unicamp.br/~chibeni

1. Modelo atômico de Rutherford-Bohr (1913)

Quando, no início da segunda década do século XX, Ernest Rutherford e Niels Bohr propuseram que o átomo fosse concebido como um sistema solar em miniatura, logo se colocaram diversas objeções teóricas graves. Uma delas é que, segundo a teoria eletromagnética (ainda recente, à época, mas muito bem confirmada e aceita sem restrições), uma carga em movimento acelerado emite radiação eletromagnética, e portanto perde energia. Seria o caso de um elétron girando, pois movimentos circulares são acelerados, precisam de uma força central. Ora, perdendo energia deveria ir se aproximando cada vez mais do centro de rotação, segundo prevê a mecânica newtoniana. Então foi fácil calcular que em uma fração muito pequena de segundo o elétron já “cairia” no núcleo, o que não acontece, claro.

Ninguém conseguiu solucionar esse problema fatal; o que Bohr fez em 1913 foi simplesmente “postular” que o elétron *não* irradia quando está numa órbita fixa, e que portanto o colapso do elétron no núcleo não ocorria. Claro que isso não era satisfatório, pois simplesmente era um jeito de camuflar a inconsistência do modelo com a conjunção da duas teorias básicas da física clássica, mecânica newtoniana e eletromagnetismo. Também postulou que havia *quantização* das órbitas, ou seja, que o elétron só podia orbitar a certas distâncias bem definidas relativamente ao núcleo. Isso também conflita com a

mecânica clássica, que não prevê nem é compatível com esse tipo de restrição, pois a energia do corpo em movimento pode ir variando continuamente, e portanto ele pode orbitar a qualquer distância. (Compare-se isso com, por exemplo, os satélites artificiais, que podem ser colocados em órbita na altura que se queira.) Com a quantização das órbitas Bohr queria explicar por que a radiação emitida é descontínua, em raias, e não num contínuo, como a radiação térmica de um corpo aquecido. A ideia era que a radiação seria emitida somente quando o elétron “pula” – aleatoriamente, não se sabe por que causa – de uma órbita para outra mais interna. A energia excedente sairia como radiação eletromagnética. Já circulava a ideia de que a radiação eletromagnética em certas circunstâncias é quantizada, ou seja, existem em “pacotes” de energia bem definida, e não como uma onda, como previa o eletromagnetismo. Essa tese foi a que Einstein propôs em seu estudo do efeito fotoelétrico, em 1905. (A proposta não foi bem recebida à época; mas foi esse trabalho que, tardiamente, Einstein ganhou o Nobel, em 1921. O nome ‘fóton’ só foi inventado cinco anos depois.)

Com essas postulações, o modelo pôde prever com precisão impressionante as raias do hidrogênio. Mas outro problema tão grave quanto os precedentes (de consistência teórica) era que as *previsões* davam errado – e muito errado – já a partir do átomo de hélio, com dois elétrons. Isso também não foi resolvido pela velha teoria quântica. Na teoria definitiva – a mecânica quântica –, formulada em meados da década de 20, todos esses problemas se dissolveram; não é que tenham sido resolvidos, mas deixaram de fazer sentido. A noção de órbita ficou inviabilizada, já que a nova teoria não tem como acolhê-la no seu corpo teórico. Na linguagem de Schrödinger, que parece mais familiar, a função de onda – que descreve os *estados* dos objetos quânticos – na imensa maioria das situações *não* atribui ao objeto nenhuma posição bem definida; ou, mais precisamente, não pode atribuir posição e velocidade bem definidas ao mesmo tempo, como seria necessário para descrever uma órbita do tipo da do modelo de Bohr. Então, se quisermos pensar no átomo, não podemos pensá-lo

daquela forma que Bohr propôs em 1913; *como* pensá-lo, então, a teoria não diz. Fica aberta, inclusive, a possibilidade de renunciarmos a essa “visualização” intuitiva, e foi justamente essa a proposta de Heisenberg em sua formulação da MQ, que segue a filosofia antirrealista de seu mentor, Bohr. Nessa formulação não há nem mesmo a “tentação” de ver o mundo quântico de um jeito qualquer, como sugere, embora muito problematicamente, a formulação “ondulatória” de Schrödinger.

Se quisermos insistir nessa “visualização”, o melhor que temos é aquilo que os químicos inventaram, a noção de *orbital*, que seria uma espécie de “nuvem” em volta do núcleo. Mas isso é muito enganoso, pois não é uma nuvem de matéria, e sim de probabilidades (probabilidades de, numa medição de posição – que não dá para fazer do ponto de vista prático, claro – “achar” o elétron em tal lugar). Mas a rigor isso deve ser evitado, ao menos em física; para os químicos, essa ideia rende vários benefícios indiretos.

E o núcleo do átomo, ele estaria “parado”, “fixo”, imune à indeterminação quântica?¹ A resposta é claramente *não*. Tudo o que foi dito acima vale também para o núcleo e seus componentes (que não eram conhecidos à época, 1913, 1925-6, exceto os prótons). Ocorre que o núcleo é milhares de vezes mais massivo do que o elétron e isso faz com que os efeitos da indeterminação quântica sejam muito menores, num sentido *relativo*, ou seja, à medida que a massa do objeto vai aumentando, ele vai “ficando” (ou melhor, parecendo) mais “clássico”, os efeitos quânticos vão se tornando desprezíveis. Com o núcleo, mesmo os mais massivos, isso ainda *não* ocorre, como ocorre com uma bola de bilhar, por exemplo, mas em termos relativos dá para “pensar” o elétron como mais “difuso” e o núcleo como mais “parado”; mas pensar assim não é muito preciso do ponto de vista da MQ. Veja, por exemplo, que há algumas poucas décadas já se detectaram difração e interferência de nêutrons, que são cerca de 2

¹ Prefiro essa palavra do que ‘incerteza’, como explico em um artigo detalhado, “Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27 (2): 181-192, 2005.

mil vezes mais pesados do que o elétrons, e até de moléculas bastante massivas, com 60 átomos de carbono. Cada vez mais estão sendo descobertos comportamentos quânticos em coisas ou processos “grandes”, e isso é uma frente importante de teste e aplicação prática da MQ.²

2. As diferentes formulações matemáticas da mecânica quântica não-relativista

Em meados da década de 1920, os diversos desafios teóricos e experimentais surgidos na física da estrutura da matéria desde o início do século levaram à formulação da teoria que ficou conhecida como *mecânica quântica* (MQ). Curiosamente, ela foi proposta em três formulações matematicamente muito distintas: a de Heisenberg-Born-Jordan (1925), a de Dirac (1925), e a de Schrödinger (1926). A primeira envolve matrizes; a segunda, vetores e operadores em espaços de Hilbert; a terceira é uma equação diferencial da mesma família que se usa para descrever ondas clássicas. Apenas esta última tem uma forma mais familiar para o leigo com algum conhecimento de matemática básica; à época de sua formulação, essa percepção era em geral também a os próprios físicos, que, embora entendendo, não se acharam muito “à vontade” com os formalismos novos de Heisenberg e Dirac. O formalismo de Dirac é mais abstrato e matematicamente mais geral do que os dois outros, e se tornou padrão em livros-textos de MQ com viés mais rigoroso.³

Importante notar que o desenvolvimento desses três formalismos não se deveu somente a preferências matemáticas idiossincráticas ou circunstanciais, refletindo, antes, especialmente nos casos de Heisenberg e Schrödinger, posicionamentos filosóficos muito discrepantes quanto à questão do que seria a *realidade* descrita pela MQ. Heisenberg, trabalhando em Göttingen, no grupo de

² Veja-se, por exemplo, Schleich, W. P. “Wave-particle dualism in action”, cap. 19 de M. D. Al-Amri et al., eds., *Optics in Our Time*, Springer, 2016. (Open access: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-31903-2>.)

³ Ver, por exemplo, o clássico COHEN-TANNOUJJI, B. et. al. *Mécanique Quantique*. Paris, Hermann, 1977.

Max Born, e em estreita colaboração com Niels Bohr, em Copenhague, concebia a física como devendo lidar apenas com noções empíricas, ou seja, que pudessem ser objeto de observação experimental; nenhuma concepção do que seria a realidade física dos objetos quânticos seria necessária ou mesmo permitida. Seu artigo original, publicado no volume 33 da prestigiosa revista *Zeitschrift für Physik*, em meados de 1925, tinha escopo muito limitado, a previsão das raias espectrais do hidrogênio; as mesmas previsões haviam sido obtidas por Bohr em 1913, a partir de seu “modelo” de átomo, que até hoje ocupa a imaginação do leigo. Mas essa concepção de átomo estava imersa em dificuldades sérias, como mostrei na seção precedente, e Heisenberg quis derivar as mesmas previsões experimentais sem pressupor esse ou nenhum outro “modelo” físico do átomo. Logo em seguida, Born (que, aliás, foi quem enviou o artigo para publicação, sem que Heisenberg o soubesse...) e seu colaborador Pascual Jordan, iniciaram o tratamento matemático mais geral e rigoroso da proposta de Heisenberg (que estava em visita a Cambridge, Inglaterra), usando pela primeira vez a matemática de matrizes, pouco conhecida à época. Publicaram um artigo no mesmo periódico, volume 34. E finalmente, com Heisenberg já de volta a Göttingen, elaboram, todos os três, o artigo “definitivo” dessa abordagem, no volume 35, já no finzinho de 1925.

No meio tempo, Paul Dirac, que fazia doutorado em matemática em Cambridge, acabou, por via indireta, sabendo do manuscrito original de Heisenberg, e se dedicou, independentemente dele ou do resto do grupo de Göttingen, a vestir a proposta em linguagem matemática rigorosa e geral. Ele tomou como inspiração um tipo de formalismo da mecânica clássica desenvolvido no século XIX pelo irlandês William Hamilton. Publicou seus resultados preliminares ainda em 1925 e depois, em quatro substanciais artigos

no primeiro semestre do ano seguinte, que lhe valeram, mais do que merecidamente, o almejado doutorado.⁴

Por fim, a formulação da MQ desenvolvida por Schrödinger a partir do início de 1926 teve origem em uma perspectiva *realista*, segundo a qual a realidade quântica envolveria, de algum modo, a existência de “ondas” semelhantes (embora matematicamente mais complexas) às ondas da física clássica. O extraordinário *insight* para tanto se deveu ao francês Louis de Broglie, que em 1924 sugeriu que a quantização das órbitas dos elétrons no modelo de Bohr estaria ligada ao suposto caráter “ondulatório” dessas partículas (elétrons foram “descobertos” como sendo partículas, em 1887, por J. J. Thomson). Essa ideia só prosperou – garantindo a de Broglie o título de doutor – porque Einstein julgou que ela envolvia “mais do que uma analogia”, devendo ser levada a sério. Quem o fez foi Schrödinger, que a generalizou e implementou matematicamente por meio de uma equação diferencial complexa. As soluções dessa equação são usualmente chamadas de “funções de onda”. Em pouco tempo ele mesmo percebeu que tais funções não poderiam ser interpretadas como ondas ordinárias, por diversas razões físicas e matemáticas. Mas a ideia “pegou” e até hoje a maioria dos físicos costuma pensar a realidade quântica como de algum modo envolvendo funções de onda. Mas explicar *que* modo é esse é outro grande problema para a interpretação da mecânica quântica.

3. A questão da interpretação da MQ

Numa teoria física, a questão da interpretação diz respeito às relações entre os símbolos, ou mais geralmente, a linguagem da teoria, e um domínio de

⁴ Aliás, falando em Hamilton, o seu formalismo é uma das três formulações matemáticas distintas, mas fisicamente equivalentes, da mecânica clássica, os outros dois sendo o formalismo original de Newton (séc. XVII) e o de Joseph Lagrange (séc. XVIII); na verdade o formalismo de Newton era puramente geométrico; depois, foi vestido em linguagem algébrica, a partir da versão do cálculo diferencial e integral desenvolvida paralela e independentemente por Leibniz. Então se pode dizer que há quatro versões da mesma teoria mecânica clássica. Na MQ, como estamos vendo, ocorreu algo parecido, por razões completamente diferentes.

coisas distinto dessa linguagem. O mesmo ocorre nas linguagens naturais. Tomemos por exemplo a palavra – símbolo – ‘gato’. No Português falado hoje no Brasil há pelo menos três interpretações desse símbolo: 1) um tipo de animal doméstico; 2) um homem esteticamente atraente por suas qualidades físicas; e 3) um tipo de ligação de fios elétricos, usualmente malfeita e clandestina. Qual dessas interpretações a palavra tem, cada vez que é usada, depende, e é facilmente decidida, pelo contexto em que ocorre. A linguagem das teorias físicas moderna (sécs. XVII-XIX) e contemporânea (sécs. XX, XXI) envolve, ao contrário do que ocorria na física antiga e medieval, símbolos *matemáticos*.⁵ No caso da MQ, cada uma das três formulações mencionadas envolve um ramo diferente da matemática. A questão da interpretação da MQ diz respeito a forma pela qual o seu formalismo matemático se relaciona à realidade física. Ela adquire, portanto, nuances particulares em cada um dos três casos.

Um primeiro nível geral de interpretação diz respeito às *predições* experimentais da teoria. Como já mencionei, essas predições coincidem, ou seja, os fenômenos previstos pela teoria são qualitativa e quantitativamente os mesmos, qualquer que seja o formalismo adotado.⁶ Nesse nível básico, não há problema nenhum na interpretação da MQ. É como a interpretação da frase ‘o gato está no tapete’. Mesmo que os símbolos sejam outros – como por exemplo ‘*the cat is on the mat*’ – a interpretação da frase é a mesma, todo mundo que sabe os dois idiomas entende o que ela significa.

Ocorre, porém, que as teorias físicas, especialmente as modernas e contemporâneas, *aparentemente* pretendem *mais* do que descrever e prever

⁵ Galileo, que foi o principal defensor da matematização da física, dizia, metaforicamente, que a “filosofia” – referindo-se ao que hoje chamamos de ciência – “está escrita neste grandíssimo livro, que continuamente está aberto diante de nossos olhos (eu quero dizer o universo), mas que não se pode entender se não se aprende a entender a língua, e a conhecer os caracteres nos quais está escrito. Ele está escrito em língua matemática, e os caracteres são os triângulos, círculos, e outras figuras geométricas”.

⁶ Note-se que a palavra ‘fenômeno’ é aqui usada em seu sentido original, grego, daquilo que aparece, ou se pode observar sensorialmente, como a posição de um ponteiro de um determinado aparelho, ou a imagem que se forma numa chapa fotográfica.

fenômenos. Via de regra – com exceções importantes, como a termodinâmica e a relatividade especial – elas procuram *explicar* os fenômenos postulando a existência de entes e processos inobserváveis sensorialmente, que seriam as causas dos fenômenos. Tais entes e processos constituem o que os filósofos chamam de a *ontologia* da teoria. Por exemplo, a ontologia da teoria eletromagnética envolve cargas elétricas, campos elétricos e magnéticos e a interação entre eles, etc. Quem desenvolveu a forma definitiva da teoria, o escocês J. C. Maxwell, achava que a ontologia eletromagnética deveria incluir também uma substância sutil chamada *éter*. No finzinho do século XIX, a existência desse éter começou a ser questionada, e no século seguinte foi virtualmente abandonada pela comunidade dos físicos. Isso em nada alterou a capacidade preditiva da teoria, mas deixou em aberto a questão de se explicar “onde” as ondas eletromagnéticas “ondulam”.

Da mesma forma, havia, ainda no início do século XX, uma divergência entre físicos se haveria ou não átomos. Neste caso, houve uma rápida convergência a favor dessa existência, entre outras razões pelo trabalho de Einstein sobre o movimento browniano (1905) e pela confirmação experimental de suas previsões (1913). Pois bem: assumindo que existem átomos, tratou-se de correlacionar suas propriedades com fenômenos como a produção de raios espectrais, ou seja a luz supostamente emitida por eles não ocupa todo o espectro eletromagnético de forma contínua; ela é concentrada em algumas frequências. Um primeiro passo importante nesse trabalho de explicar a radiação eletromagnética dos elementos químicos pela ontologia atômica foi justamente o já mencionado modelo atômico desenvolvido por Rutherford e Bohr (a chamada “velha teoria quântica”).

Também como já dito, essa teoria rudimentar estava imersa num mar de problemas, tanto de consistência interna como mesmo de ajuste quantitativo, para átomos maiores do que o de hidrogênio (ou seja, todos os outros). Os esforços dos físicos se voltaram para esses problemas. A MQ, tal qual desenvolvida na década de 1920, foi a resposta final dada pelos físicos, ou seja,

em qualquer uma de suas três versões ela é uma teoria consistente e que, aos poucos, foi se mostrando imensamente bem sucedida em predizer não apenas os fenômenos de radiação eletromagnética mas uma infinidade de outros tipos de fenômenos.

Essa história de sucesso foi porém marcada desde o início por uma profunda divergência entre os pais da teoria sobre a sua “interpretação”, entendida no segundo sentido que apontei acima, ou seja, em que medida, e como, essa teoria poderia representar uma realidade causal subjacente aos fenômenos que prediz. Como já notei, a proposta *filosófica* de Heisenberg, ligada às escolas de Copenhague e Göttingen, era a de explicitamente passar ao largo dessa questão: não resolvê-la, mas desqualificá-la filosófica e cientificamente. Numa expressão famosa do mentor do grupo, Niels Bohr, “a interpretação física apropriada do formalismo simbólico da mecânica quântica resume-se *apenas* em predições, de caráter determinado ou estatístico, relativas a fenômenos indivisíveis que aparecem sob condições definidas por conceitos da física clássica”.⁷ Em outros termos, as “equações” matriciais da teoria permitem prever fenômenos ditos atômicos sem falar nada sobre átomos, elétrons, etc., em claro contraste com a velha teoria de Bohr, em que a emissão de luz em uma raia espectral, por exemplo, está ligada ao “pulo” de um elétron de uma órbita para outra mais próxima ao núcleo. Todo um conjunto de problemas físicos ligados a essa “imagem” do átomo deixa, portanto, de existir na abordagem de Heisenberg.

Essa solução – ou melhor, dissolução – do problema da interpretação da MQ se tornou rapidamente aceita entre os físicos, com três notáveis exceções: de Broglie, Einstein e Erwin Schrödinger. Um importante debate em fundamentos filosóficos da física se travou entre eles e a nova “ortodoxia” de Copenhague/Göttingen, debate que se prolongou até a morte de seus

⁷ Bohr, N. “Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics”, in Schilpp *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, 3 ed. La Salle, Illinois, Open Court, 1949, pp. 201-41.

protagonistas (simplificando a história um pouco, pois de Broglie e Schrödinger saíram de campo por algum tempo e depois voltaram), e continua até hoje, em outra mãos e em termos diversos. O ponto central da dissidência era filosófico: para Einstein, o mentor do grupo dissidente, a física deveria ser entendida como “a representação do Real”, ou seja, não apenas predizer fenômenos, mas explicá-los causalmente com base em uma ontologia, mesmo que ela envolvesse itens sem acesso empírico direto. Quando Schrödinger formulou sua versão da MQ, o debate sobre a realidade quântica ainda não estava plenamente instalado; mas sentia-se seu “cheiro” no ar. E assim como Heisenberg seguiu um veio *antirrealista* (a expressão que os filósofos cunharam para designar, entre outras, a postura de entender as teorias como meros instrumentos de cálculo de fenômenos), Schrödinger adotou uma postura *realista*, que procurava preservar uma realidade quântica nos moldes sugeridos por de Broglie, ou seja, da existência de “ondas” de matéria. A sua abordagem ondulatória pareceu inicialmente uma via promissora para isso, mas, como já notei, logo se percebeu que as “ondas” da equação de Schrödinger não poderiam, salvo casos triviais, ser ondas em nenhum sentido clássico, como entes reais do mundo. Matematicamente havia uma semelhança com equações de onda clássicas, mas ir além disso se mostrou muito problemático.

De forma muito interessante, apesar disso a teoria de Schrödinger *não* foi rejeitada, em favor das alternativas ontologicamente “limpas” de Heisenberg e Dirac. Muito ao contrário, a matemática mais familiar usada por Schrödinger mostrou-se muito atraente para os físicos em geral. O próprio Heisenberg a usou em seu famoso artigo do “princípio da incerteza”, de 1927. Além disso, apareceu logo uma “solução” de compromisso para a interpretação das funções de onda quânticas, e ela foi proposta por ninguém menos do que o próprio Max Born – uma figura cuja importância para o desenvolvimento da MQ foi por muito tempo gravemente subestimada; ele só ganhou o Nobel em 1954! O que Born mostrou é que o *módulo quadrado da função de onda*, expressa em termos das coordenadas espaciais, representava a *probabilidade* de uma detecção da

posição do “ente” quântico se dar em tais e tais localizações espaciais. (Se pensarmos – problematicamente, claro – no elétron como uma partícula, essa grandeza matemática dá a distribuição de probabilidade de o elétron ser “achado” neste ou aquele ponto do espaço, quando se faz uma medida de sua posição.)

Ironicamente, essa interpretação probabilista de Born é que acabou “salvando” a abordagem de Schrödinger de sua aparente desconexão com a realidade empírica. Mas o problema filosófico que motivou o físico austríaco permaneceu em aberto: que tipo de coisa “ondulante” seriam os objetos quânticos? É nesses termos que o debate sobre a interpretação da MQ – o problema da ontologia quântica, se é que há alguma – se prolongou até nossos dias.⁸

4. Desdobramentos e frutos do debate sobre a interpretação da MQ

No início da segunda metade do século XX, quando o debate histórico havia amainado, começaram a surgir novidades teóricas, filosóficas e experimentais que levaram a um conjunto de propostas extraordinariamente importantes quanto à interpretação da MQ e suas implicações. Entre os novos resultados, cumpre destacar o desenvolvimento de uma teoria alternativa à MQ, com uma ontologia claramente visualizável que mescla partículas e ondas de uma forma bastante sofisticada. Trata-se da chamada “teoria de variáveis ocultas”, proposta pelo físico americano David Bohm, em um par de artigos de 1952. Sua inspiração, foi, claro, a velha sugestão de Louis de Broglie – “ondas piloto”, que guiariam as partículas de forma não-clássica – que o próprio francês havia abandonado há muito tempo. A seu turno, esse exemplo concreto de uma teoria “mais completa que a MQ”, no que diz respeito à representação da

⁸ Eu tratei desse problema extensamente em meu livro e em diversos artigos profissionais e de divulgação. Para acesso aos textos relevantes, veja-se a página de meu site <https://www.unicamp.br/~chibeni/publicacoes.htm>. Alguns dos textos são acessíveis a um público geral, como por exemplo: 2001b [A interpretação da mecânica quântica](#); 1993 [A microfísica e a não-localidade](#); 1992 [Implicações filosóficas da microfísica](#).

realidade, reabriu uma discussão de fundo muito importante sobre o valor de uma famosa “prova” de que isso seria impossível, oferecida já em 1932 pelo grande sistematizador da matemática na mecânica quântica, John von Neumann. O estudo de provas “matemáticas” da impossibilidade de teorias desse tipo levaria não apenas ao esclarecimento do aparente conflito entre a prova de von Neumann e a teoria de Bohm (brinca-se que Bohm teria feito algo impossível), mas ao desenvolvimento de novas provas desse tipo. Mais importante ainda, em uma frente paralela de estudo das possíveis outras teorias de variáveis ocultas, o físico escocês John S. Bell chegou, em 1964, a um dos resultados mais importantes da física do século XX, a agora chamada “desigualdade de Bell”. Ela trouxe à tona uma noção que havia sido central no debate histórico entre Einstein e Bohr sobre a interpretação da mecânica quântica, a *localidade*. Para Einstein, os processos físicos deveriam obrigatoriamente ser sempre locais, ou seja, não poderia haver influência física instantânea de um objeto sobre outro distante. Embora o tema seja complexo demais para ser abordado aqui, o que Bell mostrou é que, dependendo de certos resultados empíricos à época ainda a serem investigados, toda teoria de variáveis ocultas deveria ser, como a de Bohm, *não local*. Uma corrida aos laboratórios então começou, com o resultado mais importante sendo publicado em 1982, por uma equipe francesa liderada por Alain Aspect. Esses resultados mostraram a clara violação da desigualdade de Bell, e portanto a existência de um obstáculo considerado impeditivo para se modificar a MQ no sentido de se recuperar uma visão mais clássica do mundo quântico. Não só para Einstein, mas para físicos em geral a existência de processos não locais é altamente problemática.

Hoje em dia o estudo da chamada não localidade quântica, que a seu turno depende de uma característica dos estados quânticos estudada pioneiramente por Schrödinger, em seu debate, ao lado de Einstein, com os antirrealistas da escola de Copenhague, chamada de “emaranhamento quântico”. (O artigo clássico sobre esse ponto, de 1935, é onde aparece a famosa ilustração do “gato” de Schrödinger.) Esses estudos se ramificaram em diversas e surpreendentes

direções, algumas das quais com tremendo potencial prático, como a criptografia e a computação quânticas. Paradoxalmente, embora em certo sentido as questões suscitadas pela abordagem de Schrödinger (mas *não* pelas abordagens “secas” de Heisenberg e Dirac) tenham permanecido em aberto no *front* filosófico – o que aliás, é típico e esperado de um bom debate filosófico – no plano teórico e experimental elas acabaram abrindo instigantes horizontes de pesquisa. Isso mostra, talvez, que discussões filosóficas em fundamentos da física não devem ser descartadas como inúteis, ou a serem postas de lado, seja lá em nome do que for.

Sugestões de leitura:

Bricmont, Jean. *Quantum Sense and Nonsense*. Springer, 2018.

Gribbin, J. *In Search of Schrödinger's Cat*. Quantum Physics and Reality. London, Corgi Books, 1984. <https://www.amazon.com.br/Search-Schrodingers-Cat-Quantum-Physics-ebook/dp/B004JN1CIS>

Jaeger, Lars. *The Second Quantum Revolution*. From Entanglement to Quantum Computing and Other Super-Technologies. Spriger, 2018.

Pessoa Jr., O. *Conceitos de Física Quântica*. Vols. I e II. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2003 e 2006.

Rae, A. *Quantum Physics: Illusion or Reality?* Cambridge, Cambridge University Press, 1986.

Squires, E. *The Mystery of the Quantum World*. Bristol, Adam Hilger, 1986.

Kumar, M. *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate About the Nature of Reality*. Icon Books, 2008. <https://www.amazon.com.br/Quantum-Einstein-Debate-Reality-English-ebook/dp/B002RI9ZRC>.