

A mecânica quântica em construção

Nelson Pinto Neto

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

A mecânica quântica foi construída no início do século XX como um algoritmo de cálculo para organizar e prever os resultados estranhos dos mais variados experimentos envolvendo o mundo microscópico (moléculas, átomos, partículas elementares), que pareciam aleatórios, mas com uma distribuição probabilística previsível. Apesar do seu sucesso absoluto, os alicerces conceituais deste algoritmo são ainda obscuros e extremamente controversos. Como conectar o mundo microscópico descrito pela mecânica quântica com o mundo macroscópico da nossa experiência diária? Qual o papel dos observadores nesta conexão? Porque os estranhos fenômenos quânticos não acontecem em escalas macroscópicas? Como explicar a natureza não-local dos fenômenos quânticos? Neste artigo, apresentarei algumas das tentativas de respostas a estas e outras questões básicas, que se constituem como diferentes teorias com visões de mundo completamente distintas, comentando suas qualidades e defeitos. Concluiremos que a teoria quântica ainda está em construção, pois não há uma formulação consensual. Sua elaboração é um problema fundamental da Física contemporânea, e do pensamento em geral.

Abstract

Quantum mechanics was developed in the early 20th century as a computational algorithm to organize and predict the strange results of a wide variety of experiments involving the microscopic world (molecules, atoms, elementary particles), which appeared random but had a predictable probabilistic distribution. Despite its overwhelming success, the conceptual foundations of this algorithm remain unclear and extremely controversial. How can we connect the microscopic world described by quantum mechanics with the macroscopic world of our daily experience? What is the role of observers in this connection? Why don't strange quantum phenomena occur on macroscopic scales? How can we explain the nonlocal nature of quantum phenomena? In this article I will present some attempts to answer these and other basic questions, which constitute different theories with completely different worldviews, commenting on their strengths and weaknesses. We will conclude that quantum theory is still under construction, as there is no consensual formulation. Its development is a fundamental problem in contemporary physics, and in thought in general.

Palavras-chave: mecânica quântica; localidade, função de onda quântica; interferência quântica; colapso da função de onda.

Keywords: quantum mechanics; locality; quantum wave function; quantum interference; wave function collapse.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n2.50044](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n2.50044)

1 Introdução

O mundo microscópico, descrito pela mecânica quântica, é muito estranho. Imaginemos que, sobre uma mesa de sinuca, coloque-se um pedaço de madeira retangular com dois grandes orifícios pelos quais bolas de sinuca possam passar. Este pedaço de madeira divide a mesa de sinuca em dois lados. De um lado está uma bola de sinuca preta, sempre posicionada no mesmo ponto equidistante dos dois orifícios, e do outro uma bola de sinuca branca quântica. Um jogador de olhos

vendados tentará fazer com que a bola branca atinja a bola preta passando através do pedaço de madeira, mas um dos orifícios está fechado. Após muitas repetições, mede-se a razão entre o número de vezes que o jogador acertou a bola preta e o número de tentativas. A seguir, o outro orifício é aberto, e o que estava aberto é fechado. Novamente, mede-se a razão entre acertos e tentativas, para um grande número de tentativas. Finalmente, os dois orifícios são abertos. O resultado esperado é que, com os dois orifícios abertos, a razão entre acertos e tentativas será a

soma das duas anteriores, pois a bola ou passa por um orifício ou pelo outro. Entretanto, acontece algo totalmente inesperado: por mais que o jogador tente, ele nunca acerta a bola preta! Pior, se o jogador tirar a venda dos olhos logo após a tacada e verificar por qual orifício a bola passou, o jogador acerta a bola preta com a frequência esperada! Finalmente, se colocarmos a bola preta numa posição que não seja equidistante dos dois orifícios, a bola branca quântica pode atingir a bola preta, mas com uma frequência diferente da soma das duas frequências obtidas quando um dos orifícios está fechado. Mas então, por onde afinal passou a bola de sinuca quântica quando os dois orifícios estão abertos? Se a cada tacada a bola quântica tivesse passado por apenas um dos orifícios, então a frequência com que a bola preta é atingida deveria ser a soma das frequências para os casos onde um dos orifícios estava fechado, o que não é verdade. Será que não passou por nenhum orifício? Não, porque se fecharmos os dois orifícios não há colisão com a bola preta, em qualquer posição que esta esteja. E porque o resultado coincide com o esperado quando o jogador observa por qual orifício a bola passou?

Outra característica importante do mundo quântico se expressa no chamado Princípio da Incerteza. De acordo com este princípio, verificado em inúmeros experimentos, existem pares de propriedades de partículas quânticas que não podem ser conhecidas simultaneamente com precisão absoluta, como sua posição e sua velocidade, ou seu spin (um tipo de momento angular intrínseco) em direções diferentes. Este princípio, se verdadeiro, liquida com o determinismo clássico, que pressupõe o conhecimento de posições e velocidades de um sistema clássico de partículas em algum instante de tempo para que possamos determinar sua configuração em qualquer outro instante de tempo.

Nas primeiras décadas do século XX, este e outros tipos de fenômenos estranhos foram observados em experimentos com átomos e partículas elementares. Em 1927, no congresso de Solvay, na Bélgica, tais fenômenos foram muito discutidos pelos melhores físicos da época. Todos sabiam que o tipo de situação descrito no exemplo da mesa de sinuca, embora envolvendo bolas (partículas), é típica dos fenômenos ondulatórios. Quando uma onda de luz, por exemplo,

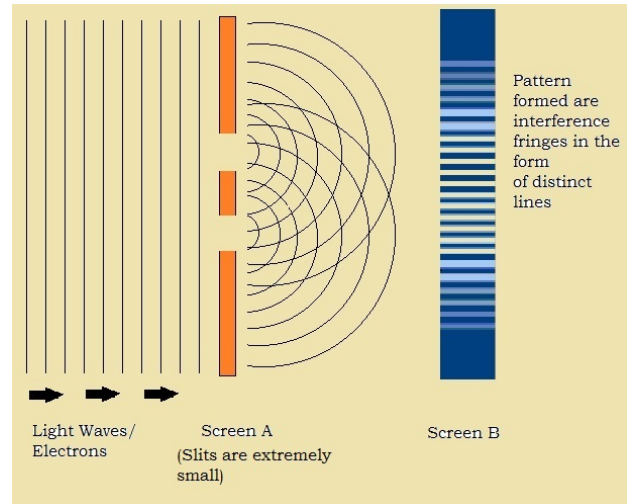


Figura 1: Figura de interferência quântica para o caso de partículas quânticas, elétrons, atravessando uma fenda dupla. Créditos: cortesia de [Intuitive Science](#).

atravessa um anteparo com dois orifícios acontece o fenômeno da interferência entre as duas frentes de onda que emergem dos dois orifícios. Ao atingir uma tela, nota-se que algumas faixas da tela ficam totalmente escuras. Estas são faixas onde ocorre uma interferência destrutiva entre as duas frentes de onda, algo bem entendido e bastante testado experimentalmente pelos físicos da época. Seguindo este raciocínio, a bola branca quântica nunca atinge a bola preta quando os dois orifícios do pedaço de madeira na mesa de sinuca estão abertos porque há uma onda associada à bola branca quântica, e a bola preta está situada numa região de interferência destrutiva desta onda, impedindo que a bola branca chegue ao local. Quando um dos orifícios está fechado só há uma frente de onda, a que emerge pelo orifício aberto. Portanto, não há interferência, e a bola branca pode atingir a bola preta eventualmente. Também percebeu-se que uma outra propriedade muito conhecida das ondas ajudariam a justificar o Princípio da Incerteza: ondas muito localizadas tem alta dispersão em suas velocidades, por outro lado ondas com velocidade muito bem definida não tem localização bem definida (ondas planas).

A Fig. 1 exibe uma figura de interferência envolvendo partículas quânticas reais (elétrons). É fácil ver as regiões onde o elétron não pode chegar.

No congresso de Solvay já havia um consenso

entre os físicos presentes de que uma onda estaria associada aos fenômenos quânticos, mas como isto se dá concretamente? Como ainda explicar o fato de que, ao olhar o orifício por onde a bola quântica passou, o efeito de interferência se perde? O físico francês Louis de Broglie (1892-1987) propôs que associada à partícula existiria uma onda que informa à partícula sobre tudo o que está a sua volta (o número de orifícios abertos, se alguém está observando, etc.). O físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) sugeriu que as partículas seriam pacotes de onda localizados. Finalmente, os físicos alemães Max Born (1882-1970) e Werner Heisenberg (1901-1976) propuseram que o mundo quântico seria um mar de potencialidades que só teriam realidade através de alguma observação concreta. A onda, depois chamada de função de onda pois está definida no espaço contendo todas as possíveis posições de todas as partículas que formam o sistema quântico, daria a probabilidade de uma determinada potencialidade se tornar realidade através de um experimento. Veja na Fig. 2 uma foto dos grandes físicos que participaram desta conferência.

Durante a conferência não se chegou a um consenso sobre a melhor maneira de abordar os fenômenos quânticos. Entretanto, uma postura pragmática foi adotada, e a terceira opção foi escolhida. A partir daí a imensa maioria dos físicos se preocupou muito mais em aplicar a teoria aos mais variados domínios e testá-la experimentalmente (com grande sucesso) a partir do algoritmo mínimo de produção de resultados com o qual todos concordavam do que investigar questões fundamentais a respeito deste algoritmo. Este império conceitual e prático, impulsionado pela produção da bomba nuclear e consonante com a visão pragmática do capitalismo do pós-guerra, se tornou tão poderoso que qualquer tentativa de questioná-lo ou entendê-lo com mais profundidade era considerada metafísica ou filosofia absolutamente supérflua.

Felizmente, alguns grandes físicos da época continuaram buscando um entendimento mais profundo dos fenômenos quânticos, produzindo artigos cruciais para o desenvolvimento da teoria quântica, com novos resultados experimentais que nunca teriam sido sequer pensados se não tivesse havido estes questionamentos. Hoje pode-se



Figura 2: Foto da conferência de Solvay. Créditos: Benjamin Couprie. Fonte: [Wikimedia Commons](#).

dizer que existem muitas formas de entender os fenômenos quânticos, sem nenhuma preponderância de uma sobre a outra. Cada uma delas possui virtudes e lacunas, mas nenhuma é suficientemente convincente para se tornar um consenso. Estas diferentes abordagens permitem também obter resultados e avanços que dificilmente seriam obtidos no escopo das outras. Vale enfatizar que as discussões e críticas levantadas por diversos cientistas não são apenas questões metafísicas ou filosóficas inconsequentes. Elas podem sim, se consideradas com seriedade, levar a uma compreensão muito mais profunda da teoria quântica, com resultados experimentais concretos. Nas sessões a seguir farei um resumo das principais teorias que abordam os fenômenos quânticos e suas visões de mundo. Todas elas concordam com todos os resultados experimentais até hoje obtidos, mas são conceitualmente profundamente distintas, podendo inclusive implicar em resultados discordantes de experimentos idealizados mas ainda não realizados.

2 A interpretação de Copenhague da mecânica quântica

Existe uma tensão fundamental que permeia boa parte da polêmica em torno da mecânica quântica ligada ao que se entende fundamentalmente por Ciência. Enquanto uma corrente, capitaneada pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) defende que a Física recai apenas sobre o que podemos conhecer sobre a natureza, a outra, capitaneada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955), defende que o objetivo

maior da ciência é encontrar descrições objetivas (independente de observadores) do mundo. Esta diferença pode ser muito bem exemplificada através de uma analogia com um jogo conhecido envolvendo adivinhação de palavras. Ana sai de uma sala onde seus amigos estão reunidos, enquanto estes escolhem uma palavra qualquer. Ela volta, e após uma série de perguntas, às quais seus amigos só podem responder sim ou não, ela descobre a palavra. A seguir sai João, mas os amigos que ficam na sala não escolhem palavra alguma, e combinam responder sim ou não aleatoriamente desde que as repostas não sejam conflitantes com nenhuma anterior. João volta e faz suas perguntas, cujas respostas se tornam cada vez mais demoradas. Pouco a pouco, uma palavra vai sendo construída e, ao final, João afirma esta palavra por ser a única consistente com todas as respostas de seus amigos. A chamada interpretação de Copenhague da mecânica quântica, advocada por Bohr, Heisenberg, Born e tantos outros, entende os fenômenos quânticos em consonância com a segunda forma de realizar o jogo, nada será acrescentado aos fatos tais como eles nos aparecem nos experimentos:

i) Os fenômenos quânticos (a colisão entre a bola branca e a bola preta) são aleatórios, imprevisíveis e únicos. Apenas sua distribuição estatística (número de vezes em que acontece a colisão pelo número de tentativas) possui algum padrão.

ii) Não se pode atribuir qualquer propriedade a uma partícula quântica antes que esta propriedade seja efetivamente observada: as bolas quânticas só adquirem a propriedade de terem passado por um dos orifícios caso sejam observadas efetivamente passando por uma delas. Quando deixamos os dois orifícios abertos, mas sem observar por qual orifício a bola passou, o fato da bola branca nunca atingir a bola preta atesta que não é possível pensar por qual orifício a bola branca passou.

iii) Certas propriedades das partículas quânticas não podem coexistir: ao se tentar conhecer uma propriedade nova, propriedades adquiridas anteriormente podem ser destruídas (não existem partículas que tenham spins em direções diferentes simultaneamente determinados). Este é o Princípio da Incerteza de Heisenberg. O determinismo clássico está liquidado.

Conclui-se, segundo a interpretação de Cope-

nhague, que não se pode atribuir estados de realidade às propriedades das partículas quânticas independentemente da observação humana. Perguntar por onde passou a bola quântica não faz qualquer sentido sem que haja algum artefato experimental destinado a responder esta questão. Não existe realidade objetiva, isto é, independente das observações. Propriedades quânticas (a possibilidade da bola quântica passar por um dos dois orifícios) são potencialidades que só se realizam através de uma medida.

Por outro lado, parece evidente a existência de realidade objetiva (existência de propriedades independentemente da observação) no mundo macroscópico. Ninguém duvida que a Lua girava em torno da Terra bem antes de haver qualquer ser vivo sobre este planeta. As questões envolvendo o momento em que as potencialidades quânticas se tornam fatos concretos e a fronteira entre o clássico e o quântico - que estão correlacionadas - são extremamente delicadas e controversas dentro da teoria quântica.

Para Bohr, nossa mente funciona classicamente. Os conceitos que entendemos e podemos comunicar aos nossos pares são clássicos e, como tal, qualquer teoria científica deve ser formulada em termos clássicos. Também por isso, é óbvio que um aparelho de medida deve necessariamente ser clássico, já que seus resultados devem ser passíveis de compreensão e comunicação por nós, humanos. Segundo esta visão, portanto, o mundo quântico não faz sentido sem a existência de um mundo clássico independente, cada um descrito por seu conjunto particular de leis. É através da interação com o mundo clássico que as potencialidades quânticas se tornam fatos concretos objetivos.

Entretanto, vários outros físicos, mesmo os inseridos na interpretação de Copenhague, não se satisfizeram com este esquema. Imagina-se que tudo seja formado por átomos, inclusive os objetos clássicos, então em que momento se faz necessário abandonar a descrição quântica de um sistema físico e empregar os esquemas característicos do mundo clássico? Porque não vemos comportamento quântico em quase nenhum sistema físico macroscópico? Por outro lado, hoje existem em laboratórios materiais que podem ser vistos a olho nu (envolvendo, por exemplo, circuitos supercondutores a baixíssimas temperaturas)

com comportamento quântico. Então, onde está o limite? Não seria possível unificar o mundo clássico e quântico em uma única descrição? Estas são questões extremamente relevantes. Deixá-las sem respostas torna a teoria vaga e imprecisa.

A quase impossibilidade de se observar fenômenos quânticos no nível macroscópico só foi melhor compreendida a partir dos trabalhos do físico alemão Heinz-Dieter Zeh (1932-2018) na década de 70, e do físico polonês Wojciech Hubert Zurek (1951-) na década de 80. Quando investigamos um sistema macroscópico só estamos interessados em uns poucos graus de liberdade coletivos (centro de massa, por exemplo) dentre os inúmeros graus de liberdade do sistema. Ao reduzir a descrição quântica a estes poucos graus de liberdade, possíveis efeitos de interferência coerente são destruídos devido ao grande ruído dos graus de liberdade não observados, num fenômeno chamado de decoerência. Este fenômeno foi depois observado em laboratório, culminando no prêmio Nobel de 2012. Para se ter uma ideia das dificuldades que alguns dos pioneiros da ideia de decoerência quântica enfrentaram, cabe aqui citar a seguinte frase de Zeh sobre suas pesquisas nesta direção:

(...) era absolutamente impossível naquele tempo discutir estas ideias com os colegas, ou mesmo publicá-las. Um influente vencedor do prêmio Nobel de Heidelberg francamente me informou que novas atividades sobre este assunto iriam encerrar minha carreira acadêmica!

O prêmio Nobel citado era o físico alemão Johannes Hans Daniel Jensen (1907-1973).

Hoje a decoerência é um fenômeno muito conhecido e estudado, principalmente porque é um dos grandes empecilhos à construção de um computador quântico de grande porte.

Outra questão fundamental intrinsecamente relacionada à transição quântico-clássico é entender o que de fato se passa num processo de medida que eleva uma potencialidade quântica ao nível de um dado real e objetivo. O físico-matemático húngaro-americano John von Neumann (1903-1957) se debruçou sobre esse problema. Ele investigou como a função de onda que descreve o aparelho de medida e o sistema quântico se comporta quando há uma interação entre eles. Foi mostrado que a função de onda se bifurca em vários pacotes que não se superpõem, como ra-

mos emergindo de um tronco de árvore, cada um centrado num dos resultados possíveis do experimento, o que foi um grande avanço. Entretanto, não há nada na teoria que privilegie um dos ramos em relação aos demais, e sabemos que ao final de uma medida só um resultado aparece. Esta unicidade factual final continua sendo um mistério. Por isso, na maioria das exposições da interpretação de Copenhague é imposto o postulado adicional do colapso da função de onda: ao final de uma medida quântica, apenas um dos ramos sobrevive, os outros desaparecem num processo aleatório adicional à evolução dinâmica da função de onda que Schrodinger havia proposto no congresso de Solvay.

3 A teoria de de Broglie-Bohm

Em 1927, no congresso de Solvay, o físico francês Louis de Broglie (1892-1987) apresentou a sua teoria de onda piloto sobre os fenômenos quânticos. Para de Broglie, a posição dos objetos quânticos teriam realidade objetiva independente da observação, tanto no nível macroscópico quanto microscópico. Desta forma simples, ele estendia a noção de realidade objetiva também ao mundo microscópico, unindo, por definição, o microcosmo ao macrocosmo, o quântico ao clássico.

Evidentemente, de Broglie tem que dar conta dos estranhos fenômenos quânticos, como a experiência da fenda dupla. Ele então sugere uma mudança radical nas leis da mecânica Newtoniana, propondo que toda e qualquer partícula tenha a sua velocidade determinada por uma onda, a função de onda que satisfaz a equação de Schrödinger, chamada onda piloto. Esta onda pode induzir uma interação não local entre as partículas nas quais atua, e por isso a teoria de de Broglie assume um realismo não local. A trajetória de cada partícula está determinada a menos da sua posição inicial, que é desconhecida, e por vezes chamada de variável escondida da teoria.

Em 1952, o físico americano David Bohm (1917-1992) retomou a teoria de de Broglie e mostrou que ela implica em todas as previsões estatísticas da mecânica quântica. Por isso ela é hoje chamada de teoria de de Broglie-Bohm da mecânica quântica. No caso do experimento de interferência quântica, cálculos explícitos destas trajetórias

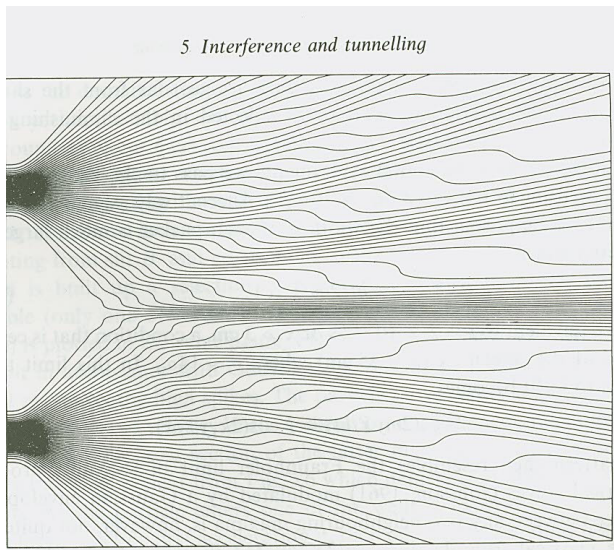


Figura 3: Trajetórias Bohmianas de um grande número de partículas quânticas arremessadas em direção a um anteparo com duas fendas. Cada partícula passa por uma ou outra fenda em posições aleatórias, cuja distribuição nas fendas é dada por uma função de onda inicial representando dois pacotes Gaussianos centrados em cada fenda. A função de onda evolui com o tempo segundo a equação de Schrödinger, e guia cada uma das partículas através das equações postuladas por de Broglie até que elas atinjam a tela final, formando uma figura de interferência. Fonte: Ref. [1].

foram realizados, cujo gráfico está apresentado na Fig. 3.

Do ponto de vista físico, a bola quântica passa por um dos orifícios, mas a onda piloto passa pelos dois e informa a bola sobre a presença do outro orifício. Na informação, que é passada continuamente à partícula, estão dados sobre o tamanho e separação dos orifícios, a possível existência de observadores com seus detectores e filtros, e tudo o mais que for relevante para o seu movimento. Vê-se que sua distribuição final no anteparo descreve uma figura de interferência perfeita.

O problema da medida quântica é facilmente resolvido na teoria de de Broglie-Bohm. Agora, além da função de onda, temos também um sistema físico descrito por suas posições espaciais atribuídas de uma realidade objetiva. Quando a função de onda que descreve todo o processo de medida se bifurca em vários pacotes de onda, o sistema físico real entra num dos pacotes (ramos), singularizando este em relação aos demais. A simetria entre os ramos é quebrada. Entretanto, não podemos saber em qual ramo o sistema entra, pois isto depende de suas posições ini-

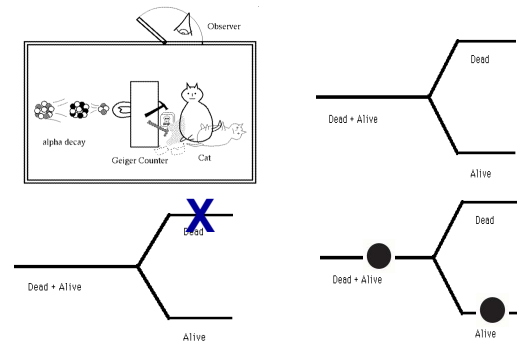


Figura 4: Gato de Schrödinger e os dois ramos de estados macroscópicos com as possibilidades de gato vivo e gato morto na parte superior direita da figura. Em Copenhague postula-se o colapso da função de onda com a eliminação ad.hoc. de um dos ramos, representado na parte inferior esquerda da figura. Em de Broglie-Bohm, o sistema físico entra em apenas um dos ramos, singularizando este ramo sem necessidade de destruir o outro, veja parte inferior direita da figura.

ais, que desconhecemos, mas podemos conhecer a probabilidade dele entrar em determinado ramo se tivermos a distribuição probabilística das suas possíveis posições iniciais. Se ela for dada pela regra usual da mecânica quântica (o módulo da função de onda inicial ao quadrado), todas as previsões da mecânica quântica podem ser obtidas. Por isso, a teoria de de Broglie-Bohm não precisa do postulado do colapso: todos podem coexistir, mas apenas aquele pacote contendo o sistema físico real tem relevância física.

Veja a Fig. 4 para uma comparação entre as visões de Copenhague e de Broglie-Bohm em relação à questão do gato de Schrödinger. Um decaimento quântico, que é aleatório, pode desencadear um processo que faça quebrar um frasco com veneno que mata o gato. Sendo um processo quântico, o gato poderia, em princípio, estar numa superposição absurda de estados vivo e morto, que no entanto não interferem entre si por serem estados macroscópicos. Como o observador externo só verá o gato vivo ou o gato morto, a interpretação de Copenhague postula o colapso de um dos ramos. Para de Broglie-Bohm, existem posições reais de todo o sistema físico, que se dirigirão a um ou outro ramo, singularizando este ramo.

Vimos anteriormente que o experimento de interferência quântica, quando analisado segundo a interpretação de Copenhague, implica na impossibilidade de se indagar sobre trajetórias, in-

dependentemente do ato de observação. Entretanto, através da teoria de de Broglie e Bohm, as trajetórias relativas àquele experimento puderam ser calculadas de forma consistente e expostas de maneira explícita, como exibido na Fig. 3. Isto mostra que a impossibilidade das trajetórias quânticas não é uma conclusão imposta a nós por fatos experimentais, como é dito em muitos cursos e livros didáticos, mas é, outrossim, consequência de uma escolha deliberada de pressupostos teóricos e filosóficos que não somos, de maneira alguma, forçados a aceitar.

Um problema fundamental que o físico irlandês John Stewart Bell (1928-1990) resolveu estudar na teoria de de Broglie-Bohm era a sua não localidade. Seria possível construir uma teoria com realidade objetiva mas local tão bem sucedida quanto a teoria de de Broglie-Bohm? Bell mostrou que a hipótese de localidade e realidade objetiva impõe que resultados de determinados experimentos deveriam satisfazer certas desigualdades que a teoria quântica não satisfaz. Esta discrepância foi mostrada pela primeira vez de maneira conclusiva em 1982 pelo físico francês ganhador do prêmio Nobel de 2022 Alain Aspect (1947-) e colaboradores. As desigualdades não eram satisfeitas, portanto a Natureza é essencialmente não local no sentido definido por Bell (embora ainda existam tentativas de salvar a localidade dos fenômenos naturais em teorias bem mais complicadas). Este é um dos resultados mais profundos da história da ciência.

4 A interpretação de vários mundos

Na sua versão mais aceita, a teoria de vários mundos, proposta inicialmente pelo físico americano Hugh Everett III (1930-1982) em 1957, toda a realidade física é descrita pela função de onda. Quando a função de onda se bifurca num processo de medida ou transição quântica, a realidade física (mundo) descrita por ela se bifurca em várias possibilidades, cada uma com sua própria realidade objetiva independente. Por exemplo, ao se realizar um experimento com N possibilidades de resultados, a função de onda que descreve sistema físico, aparelho de medida, observador, se bifurca em N ramos (mundos), cada um contendo um dos N resultados possíveis e N observadores idênticos

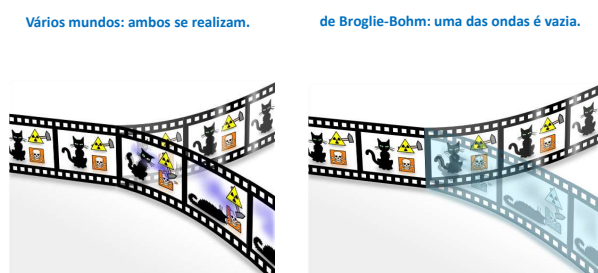


Figura 5: Gato de Schrödinger na visão de vários mundos comparado com de Broglie-Bohm. Em vários mundos os dois ramos tem importância física, realidade, uma com o gato vivo e a outra com o gato morto, mas não se comunicam (figura da esquerda). Em de Broglie-Bohm a tira do gato morto aparece mais pálida por representar uma onda vazia, sem interesse físico, o gato tem realidade somente no outro ramo (figura da direita). Créditos: Christian Schirm ([esquerda](#) e [direita](#)), através do Wikimedia Commons.

percebendo o valor correspondente ao seu mundo. Não é possível ao observador de um dos N novos mundos perceber a presença de qualquer outro dos demais mundos com seu respectivo “clone”, já que não há interferência entre mundos macroscópicos. Para qualquer um destes observadores, tudo se passa como se só o mundo dele existisse, sem nenhuma possibilidade de interação com os demais mundos. Assim, não há necessidade de colapso da função de onda. Nas palavras do próprio Everett:

Do ponto de vista da teoria, todos os elementos de uma superposição (todos os “ramos”) são “reais”, nenhum mais “real” que o outro. É completamente desnecessário supor que, após uma observação, de algum modo um elemento da superposição final será selecionado para ser agraciado com uma misteriosa qualidade chamada “realidade” e condenar os outros ao esquecimento. Podemos ser mais caridosos e permitir aos outros coexistir - de toda maneira, eles não vão causar nenhum problema já que todos os elementos da superposição (“ramos”) individualmente obedecem a equação de onda com total indiferença à presença ou ausência (“realidade” ou não) dos outros elementos.

A Fig. 5 mostra o que acontece com o gato de Schrödinger na visão dos vários mundos: o mundo com o gato vivo e o mundo com o gato morto coexistem.

Do ponto de vista puramente lógico esta é a

mais simples das teorias quânticas, pois é aquela com menos postulados: não há necessidade do postulado do colapso, nem de uma nova equação dinâmica para as posições das partículas quânticas. Por outro lado, a noção de probabilidade se torna bastante obscura: como falar da probabilidade de algo acontecer se todas as possibilidades efetivamente acontecem? Há várias propostas de resposta a esta questão, mas nenhuma se tornou consensual.

Como entender o experimento de interferência quântica nesta teoria? O físico israelense David Deutsch (1953-) argumenta que o fenômeno de interferência para a bola de sinuca quântica acontece devido à interação com uma outra bola quântica vinda de outro mundo (ramo). Este outro mundo surgiu no momento em que se abriu para a bola quântica a possibilidade de dois caminhos, um por cada orifício no bloco de madeira. O único mundo anterior (a função de onda inicial) se divide em dois. Após esta bifurcação, os dois mundos (ramos) são quase idênticos, à exceção das duas bolas quânticas, que se encontram em localizações diferentes na mesa de sinuca. Quando elas se encontram num determinado ponto, os mundos se tornam quase idênticos, e então acontece a interferência. Só nesta situação, um mundo (ramo) pode ser percebido pelo outro, ou seja, quando eles são quase iguais.

Caso a bola quântica seja observada, mas não retida, passando por um dos orifícios antes da interferência, isto desencadeia uma série de eventos em cascata no mundo (ramo) em que a bola quântica é registrada, que diferencia apreciavelmente este mundo do mundo onde a outra bola quântica passou pelo outro orifício e não foi observada. A possibilidade de uma interferência futura entre eles é quase impossível, pois exigiria a manipulação de inúmeros graus de liberdade de forma que todos sejam reconduzidos a terem os mesmos valores. Isto explica a inexistência de interferência entre artefatos experimentais e entre objetos clássicos, ambos macroscópicos.

Por mais bizarro que isto possa parecer, esta visão da teoria quântica permitiu a Deutsch provar resultados fundamentais em computação quântica que não se sabe como obtê-los em outras teorias quânticas.

5 Colapso espontâneo

Vamos agora tratar de teorias quânticas onde o colapso da função de onda é real, e é descrito por um modelo matemático preciso e concreto, ao nível das equações. Neste contexto, escalas e tempos característicos do colapso da função de onda em diferentes sistemas físicos podem ser calculados através de cálculos matemáticos rigorosos, e todas as ambiguidades associadas a este processo, discutidas anteriormente, são eliminadas. Ademais, os resultados obtidos podem ser testados experimentalmente, vinculando os modelos.

Como o colapso é um processo não linear estranho à equação de Schrödinger, tais teorias são generalizações não lineares da mecânica quântica usual. Para muitos, esta é uma tendência natural da Física, onde várias teorias lineares tiveram depois que ser estendidas ao domínio não linear para dar conta de fenômenos físicos mais complexos.

Um dos mais populares modelos de colapso espontâneo é o elaborado pelos físicos italianos Giancarlo Ghirardi (1935-2028), Alberto Rimini, e Tullio Weber, chamado de teoria GRW. Como se sabe, o processo de colapso da função da onda é totalmente aleatório, o estado para o qual uma superposição irá colapsar é arbitrário, e podemos apenas inferir a probabilidade de ocorrência de uma determinada redução da função de onda. Por isso a teoria GRW propõe que uma variável aleatória deva ser introduzida para desencadear, eventualmente, o processo de colapso. Nos intervalos de tempo onde a redução não ocorre, a função de onda obedece à equação de Schrödinger. Com estas premissas, GRW propõem que qualquer partícula massiva, além de obedecer à equação de Schrödinger, deverá sofrer a ação de processos aleatórios de localização no espaço numa certa escala de distância l , ocorrendo a uma frequência média f . Esta ação aleatória é universal e fundamental, e não tem relação com as outras interações da natureza, nem com a intervenção de observadores.

Seja então um sistema composto por várias partículas cuja função de onda seja uma superposição de dois pacotes de onda centrados em pontos diferentes do espaço, separados por uma distância macroscópica. Cada um destes pacotes é um produto de pacotes de funções de onda associa-

dos a cada uma das partículas do sistema também centrados no ponto onde o pacote total está centrado. Se uma das partículas do sistema sofrer um processo de localização espontânea para um dos pontos da superposição, a função de onda desta partícula no outro ponto colapsa a zero, anulando totalmente o outro ramo. A superposição desaparece, a função de onda final passa a conter apenas um ramo, e não há mais possibilidade de interferência macroscópica, o sistema colapsou. Portanto, o colapso será tão mais rápido quanto maior for o número N de partículas do objeto físico, e depende também da frequência f com a qual o processo aleatório de localização acontece. A teoria tem dois parâmetros livres, l e f . A escolha de GRW compatível com os experimentos até hoje realizados são $l = 10^{-5}$ cm e $f = 10^{-16}$ Hz.

Assim, um único elétron sofre um processo de localização espontânea, em média, a cada 100 milhões de anos. No caso de um sistema macroscópico, com aproximadamente 10^{24} partículas (número de Avogadro), em cada segundo este processo deve acontecer com $10^{24}f = 10^8$ partículas, causando a localização do objeto em um intervalo de tempo médio da ordem de 10^{-8} s. Assim, objetos macroscópicos, como o gato de Schrödinger ou o ponteiro de algum instrumento, colapsam muito rapidamente enquanto uma única partícula quântica pode permanecer num estado de superposição quântica, e manifestar fenômenos de interferência por um período de tempo bastante longo.

Modelos de colapso espontâneo têm alguns méritos inquestionáveis: eles permitem a convivência pacífica entre as potencialidades típicas da mecânica quântica e os fatos concretos oriundos das observações e do mundo clássico. A transição de um domínio ao outro pode ser avaliado quantitativamente, através de equações, que podem ser testadas empiricamente. Uma situação onde estes modelos poderiam ser verificados seria em sistemas mesoscópicos, onde a localização espontânea pode ocorrer em tempos nem muito curtos nem muito longos.

Nesta abordagem, a mecânica quântica é uma teoria realista e universal, sem variáveis escondidas e sem vários mundos, mas onde a equação de Schrödinger não é válida em qualquer situação. Processos não lineares suplementares envolvendo novos parâmetros fundamentais devem ser adici-

onados à teoria para que seja possível descrever completamente a evolução dos estados quânticos.

6 Conclusão e perspectivas futuras

Atualmente pode-se dizer, com segurança, que a chamada interpretação de Copenhague, a mais popular entre os físicos, é apenas uma das muitas formas de entender os fenômenos quânticos, sem nenhuma superioridade sobre as demais. Numa análise mais aprofundada, ela contém uma série de ambiguidades e limitações conceituais que impedem avanços em outras direções. Nas palavras de Einstein [2, p. 87, tradução nossa]:

A teoria quântica contemporânea [...] constitui uma ótima formulação de [certas] conexões [...] [mas] não oferece nenhum ponto de partida útil para futuros desenvolvimentos.

Um exemplo concreto é a aplicação da teoria quântica à descrição física do nosso universo, a chamada cosmologia quântica. Como nosso universo está em expansão, no passado as escalas de distância entre os componentes do seu conteúdo material devem ter sido muito pequenas, quando então efeitos quânticos podem se tornar muito relevantes. Entretanto, a interpretação de Copenhague exige um mundo clássico externo ao sistema quântico para que os fatos concretos e os conceitos clássicos relativos a este tenham sentido e existência. Ora, se o sistema a ser quantizado é a totalidade de todos os sistemas físicos, o Universo, então não pode haver mundo clássico externo a este que possa dar sentido à teoria. Desta forma, por definição, a própria concepção de cosmologia quântica não faz sentido no escopo desta interpretação. Felizmente existem as alternativas citadas acima, onde a cosmologia quântica pode ser desenvolvida sem qualquer problema conceitual.

Cada uma das alternativas à interpretação de Copenhague possui virtudes e lacunas, mas nenhuma é suficientemente convincente para se tornar um consenso. Por exemplo, as teorias de de Broglie-Bohm e de Colapso Espontâneo têm dificuldade em se acomodar aos princípios da Relatividade Restrita. Em de Broglie-Bohm todas as previsões estatísticas são consistentes com estes princípios, mas as trajetórias quânticas que dela advém, que provavelmente nunca serão observadas, não são. Já a teoria de Vários Mun-

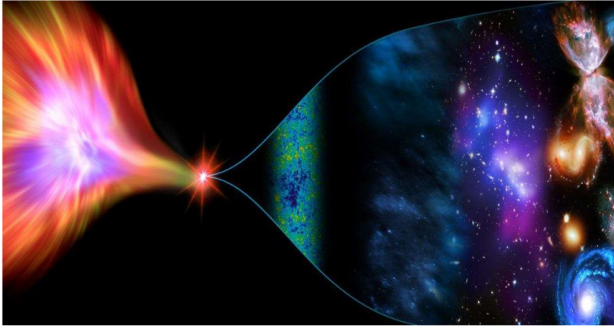


Figura 6: Modelo cosmológico onde efeitos quânticos freiam a contração do universo, lançando-o à fase de expansão que hoje presenciamos. Fonte: [Particle Cosmology Group/USTC](#).

dos é compatível com a Relatividade Restrita, porém sua ontologia é altamente extravagante e insólita.

Entretanto, estas diferentes abordagens permitem também obter resultados e avanços que dificilmente seriam obtidos no escopo das outras. Alguns exemplos são as aplicações da teoria de Broglie-Bohm à cosmologia (resultando em universos sem singularidade inicial que sempre existiram, veja Fig. 6) e à química quântica, e da teoria de Vários Mundos à computação quântica. Os resultados obtidos nestes contextos são altamente relevantes, alguns já testados experimentalmente, outros ainda por ser testados, e não se sabe como obter estes mesmos resultados no escopo da interpretação de Copenhague.

Vale enfatizar que as discussões e críticas levantadas por diversos cientistas, como Einstein, Bell e tantos outros, não são apenas questões metafísicas ou filosóficas inconsequentes. Elas podem sim, se consideradas com seriedade, levar a uma compreensão muito mais profunda da teoria quântica, com resultados experimentais concretos. Um exemplo são as investigações de Bell e o experimento de Aspect, onde mostrou-se que um certo critério de localidade, bastante amplo e intuitivo, simplesmente não é respeitado pela natureza.

Da mesma forma, as teorias alternativas descritas neste artigo, e outras que não pude descrever aqui, implicam em consequências experimentais conflitantes que talvez possam ser testadas num

futuro próximo. A cosmologia pode ter um papel importante nesta empreitada.

Finalizo este artigo com uma frase de Louis de Broglie [3]:

Tentar impedir todas as tentativas de ir além do ponto de vista presente a respeito da física quântica pode ser muito perigoso para o progresso da ciência e pode ser contrário às lições que aprendemos da história da ciência. Ela nos ensina, de fato, que o estado atual de nosso conhecimento é sempre provisório e que devem existir, além do que conhecemos atualmente, novas e imensas regiões a serem descobertas.

Para detalhes sobre este assunto tão apaixonante, as referências [4–6] indicam algumas sugestões de leitura.

Sobre o autor

Nelson Pinto Neto (nelsonpn@cbpf.br) trabalha na Coordenação de Cosmologia, Astrofísica e Interações Fundamentais do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). É Pesquisador 1B do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e é especialista em cosmologia primordial, modelos quânticos de ricochete, perturbações cosmológicas de origem quântica e suas consequências observacionais.

Referências

- [1] C. Philippidis, C. Dewdney e B. J. Hiley, *Quantum interference and the quantum potential*, *Il Nuovo Cimento B Series 11* **52**(1), 15 (1979).
- [2] P. A. Schipp (ed.), *Albert Einstein: philosopher-scientist* (MJF Books, Nova York, 1970).
- [3] D. Bohm, *Causalidade e acaso na física moderna* (Contraponto, 2015).
- [4] F. H. de Alencar Freitas e O. F. Jr, *Para que serve uma função de onda?: Everett, Wheeler, Bohr e uma nova interpretação da teoria quântica*, *Revista Brasileira de História da Ciência* **1**(1), 12 (2008). Disponível em https://www.sbhsc.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=62, acesso em set. 2025.

- [5] N. Pinto Neto, *Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2005).
- [6] G. Ghirardi, *Sneaking a Look at God's Cards: Unraveling the Mysteries of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 2005), revised ed.