



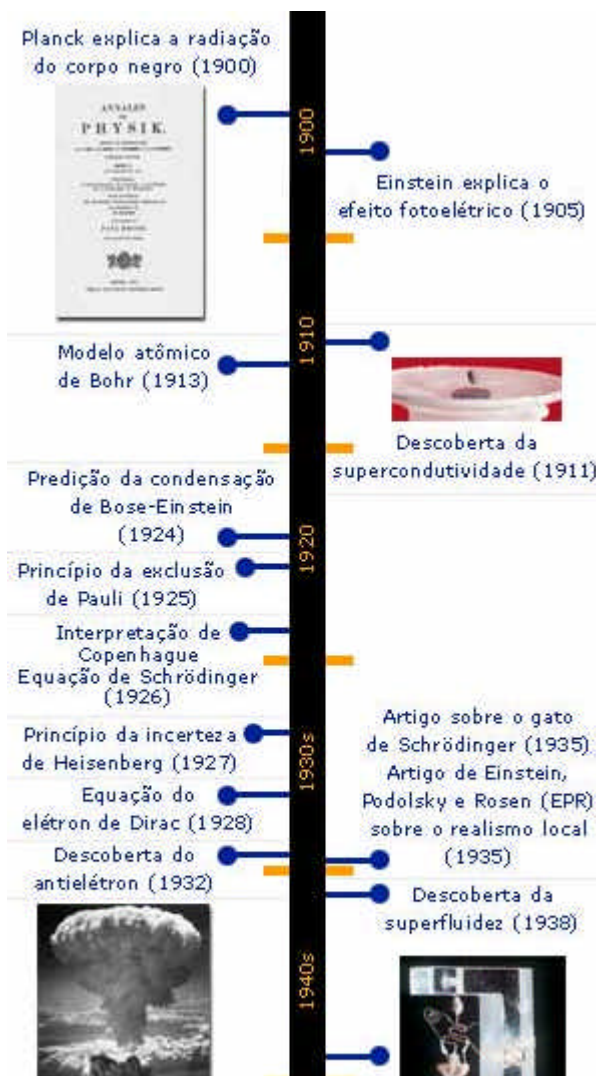
por Max Tegmark e John Archibald Wheeler

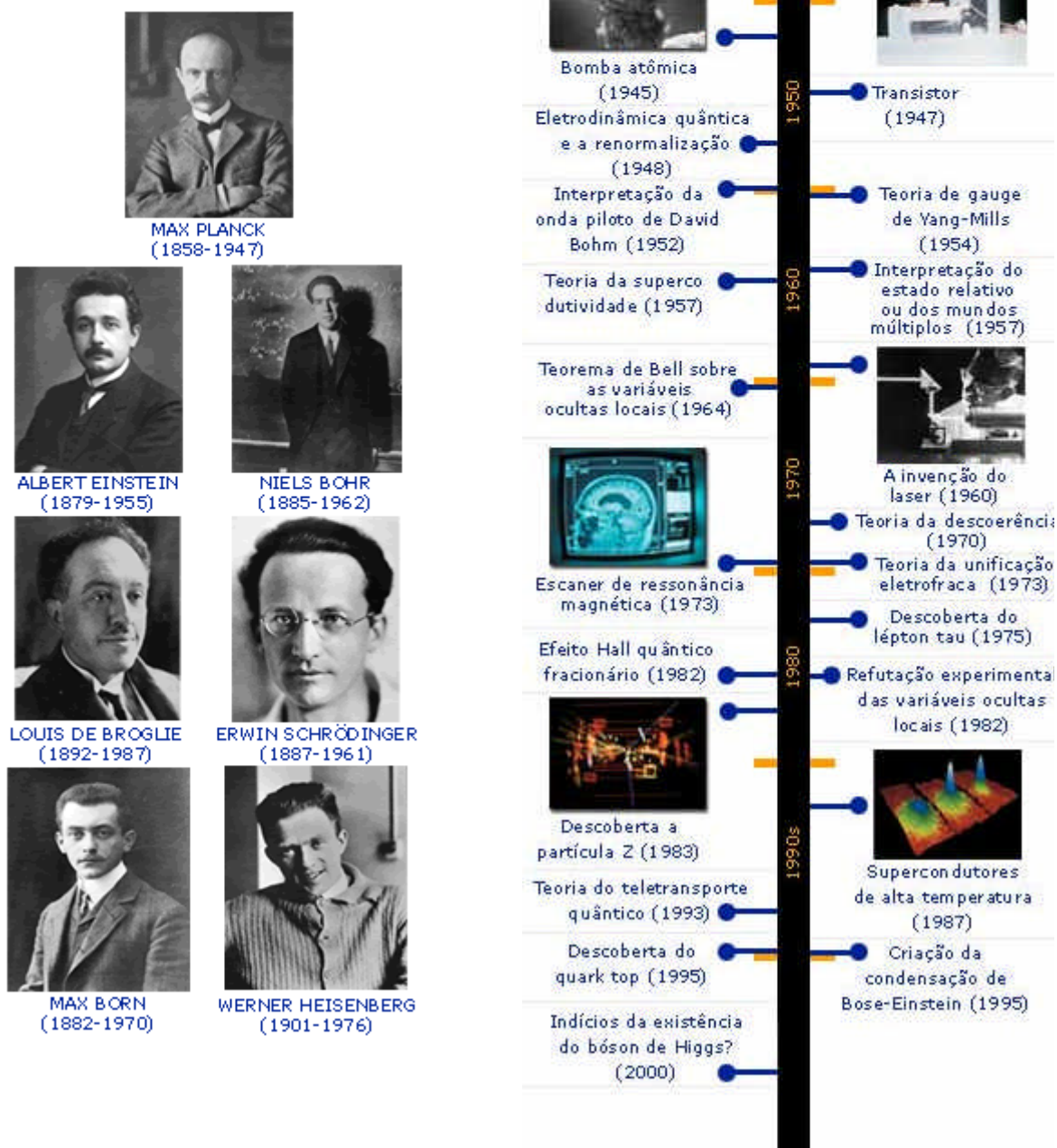
100 anos de mistérios quânticos

Ao completar cem anos, a teoria quântica exibe um saldo de proezas espetaculares e enigmas persistentes

"Daqui a poucos anos, praticamente todas as grandes constantes da Física terão sido estimadas, e... a única ocupação que restará aos homens de ciência será aumentar em uma casa decimal a precisão das medidas." Essas palavras traduzem um sentimento familiar ao século 21, especialmente quando nos vem à memória toda a barulheira sobre as proezas já realizadas. No entanto, elas foram ditas em 1871. Seu autor: o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, que as pronunciou em sua aula inaugural na Universidade de Cambridge. Elas expressam o sentimento da época (do qual, aliás, Maxwell discordava). Três décadas mais tarde, no dia 14 de dezembro de 1900, o físico alemão Max Plank anunciou sua fórmula sobre o espectro da radiação do corpo negro: estava aberto o caminho para a revolução quântica.

Este artigo é um panorama dos primeiros cem anos da mecânica quântica, com especial atenção ao seu lado misterioso, culminando com o debate atual sobre questões que vão da computação e da consciência quânticas até universos paralelos e a verdadeira natureza da realidade física. Estamos virtualmente ignorando a assombrosa gama de aplicações práticas e científicas respaldadas na mecânica quântica: estima-se que, atualmente, 30% do PIB americano dependa de invenções que só se tornaram possíveis graças à mecânica quântica - dos semicondutores dos chips de computador ao laser das leitoras de CD e à ressonância magnética dos aparelhos para produção de imagens dos hospitais.





Em 1871, os cientistas tinham boas razões para sentir-se otimistas. A mecânica e a eletrodinâmica clássicas haviam sido o combustível da revolução industrial. Parecia que suas equações básicas poderiam descrever essencialmente todos os sistemas físicos. Mas alguns detalhes irritantes teimavam em turvar aquele belo quadro. Assim, as estimativas acerca do espectro da luz emitida por um corpo incandescente não coincidiam com as observações experimentais. Essa predição clássica foi chamada de "catástrofe ultravioleta", porque, segundo ela, a exposição à intensa radiação ultravioleta, acompanhada de raios X, de um corpo incandescente deveria levar-nos à cegueira.

O desastre do hidrogênio

Em seu estudo de 1900, Planck deduziu corretamente qual era o espectro. A conclusão a que chegou, no entanto, era baseada em uma suposição tão bizarra que ele mesmo se distanciou dela alguns anos mais tarde: toda energia seria emitida apenas em pacotes finitos, chamados "quanta". Essa estranha suposição provou ser extremamente acertada. Em 1905, Albert Einstein deu um passo adiante. Ao assumir que a radiação poderia transportar energia somente em pacotes individuais, ou fótons, ele explicou o efeito fotoelétrico, graças ao qual funcionam hoje as células solares e os sensores de imagem das câmeras digitais.

A Física enfrentou um novo apuro em 1911. O físico neozelandês Ernest Rutherford argumentou, de maneira convincente, que os átomos eram constituídos por um núcleo central carregado positivamente em torno do qual orbitavam os elétrons - como se fossem sistemas solares em miniatura. Segundo a teoria eletromagnética, porém, os elétrons em órbita emitiriam radiação continuamente e se precipitariam sobre o núcleo em cerca de uns trinta minutos de tempo. É claro que isso não acontece, mas os físicos de hidrogênio, como fundamentalmente

um trilhão de segundos. É claro que já se sabia que os átomos de hidrogênio eram fundamentalmente estáveis. Essa discrepância, de fato, foi a pior falha quantitativa da história da física: minimizou a vida do hidrogênio em aproximadamente 40 ordens de grandeza.

Em 1913, o dinamarquês Niels Bohr, que fora trabalhar com Rutherford na Universidade de Manchester, Inglaterra, ofereceu uma explicação que novamente utilizava o conceito de quantum. Ele postulou que o momento angular do elétron só podia assumir valores específicos, o que confinava a partícula em um conjunto discreto de órbitas. O elétron só irradiava energia ao saltar de uma órbita para outra de menor energia, emitindo um fóton. Como um elétron na órbita mais próxima do núcleo não tinha nenhuma órbita com menor energia para a qual saltar, ele formava um átomo estável.

A teoria de Bohr dava conta ainda de muitas das linhas espectrais do hidrogênio - as frequências de luz específicas emitidas pelos átomos excitados. E funcionava também para o átomo de hélio, desde que fosse suprimido um de seus dois elétrons. De volta a Copenhague, Bohr recebeu uma carta de Rutherford, que lhe pedia para publicar os resultados de seus experimentos. O dinamarquês respondeu que ninguém acreditaria nele a não ser que explicasse o espectro de todos os elementos. Ao que Rutherford replicou: Bohr, você explica o hidrogênio e o hélio, e todo mundo vai acreditar no resto.

Apesar do sucesso inicial da ideia de quantum, os físicos ainda não sabiam o que fazer com suas regras estranhas e aparentemente ad hoc. Era como se não existisse nenhum princípio condutor. Em 1923, o francês Louis de Broglie propôs uma resposta em sua tese de doutorado: elétrons e outras partículas atuavam como ondas estacionárias. Essas ondas, tais quais as vibrações de uma corda de violão, só podiam ocorrer em certas frequências discretas (quantizadas). A ideia era tão fora do comum que a banca examinadora pediu orientação fora de seu círculo. Ao ser consultado, Einstein deu parecer favorável, e a tese foi aceita.

Em novembro de 1925, o físico austríaco Erwin Schrödinger presidiu um seminário em Zurique sobre o trabalho de De Broglie. Quando terminou, o físico holandês Peter Debye perguntou-lhe: "O senhor fala de onda, mas onde está a equação da onda?". Schrödinger produziu então sua equação, a chave mestra de grande parte da física moderna. Por volta da mesma época, os alemães Max Born, Werner Heisenberg e Pascual Jordan chegaram a uma formulação equivalente utilizando matrizes. Com essa poderosa sustentação matemática, a teoria quântica fez progressos explosivos. Em poucos anos, os físicos haviam explicado uma grande quantidade de medições, inclusive o espectro de átomos mais complicados e as propriedades das reações químicas.

Mas o que significava tudo aquilo? O que era aquela quantidade, a "função de onda", descrita pela equação de Schrödinger? Esse enigma central da mecânica quântica continua sendo uma questão poderosa e controversa até os dias de hoje.

Born teve a intuição de que a função de onda deveria ser interpretada em termos de probabilidades. Quando os físicos experimentais medem a posição de um elétron, a probabilidade de encontrá-lo em uma região determinada depende da magnitude da função de onda nessa região. Essa interpretação concedia ao acaso um papel fundamental nas leis da natureza. Einstein ficou horrorizado com tal conclusão e expressou sua preferência por um universo determinista na famosa frase "Não posso acreditar que Deus jogue dados".

Gatos estranhos e baralhos quânticos

Schrödinger também estava descontente. As funções de onda podiam descrever combinações de diferentes estados - as chamadas superposições. Um elétron, por exemplo, podia estar em uma superposição de várias posições diferentes. Segundo ele, se objetos microscópicos como os átomos podiam ficar em estranhas superposições, objetos macroscópicos também podiam, porque eram feitos de átomos. Como um exemplo barroco, ele descreveu o famoso experimento mental no qual um dispositivo perverso mata um gato caso um átomo radiativo se desintegre. Ao entrar em uma superposição dos estados "não desintegrado" e "desintegrado", o átomo radiativo produziria um gato que estaria simultaneamente vivo e morto.

O quadro Baralho Quântico mostra uma variante mais simples desse experimento mental. Pega-se uma carta de baralho com a borda perfeitamente afiada e tenta-se equilibrá-la sobre a borda em cima de uma mesa. De acordo com a física clássica, a carta permanecerá, em princípio, equilibrada para sempre. Já de acordo com a equação de Schrödinger, a carta cairá em poucos segundos, mesmo que se faça o máximo para equilibrá-la - e cairá simultaneamente para os dois lados, direito e esquerdo.

Quando se põe em prática esse experimento com uma carta verdadeira, conclui-se que a física clássica está errada: a carta cai mesmo. Mas o que se vê é que ela cai para a direita ou para a esquerda, aparentemente ao acaso, e nunca para a direita e para a esquerda ao mesmo tempo, como a equação de Schrödinger quer nos fazer acreditar. Essa contradição enganosa é o próprio cerne de um dos mistérios mais originais e duradouros da mecânica quântica.

A interpretação de Copenhague da mecânica quântica, que evoluiu a partir das discussões entre Bohr e Heisenberg no final da década de 1920, aborda o mistério a partir do caráter especial das observações ou medições. Enquanto a carta não é observada, sua função de onda evolui segundo a equação de Schrödinger: uma evolução contínua e uniforme, que em matemática é chamada de "unitária", e que tem várias propriedades interessantes. A evolução unitária produz a superposição segundo a qual a carta cai para a esquerda e para a direita. No entanto, o ato de observar a carta desencadeia uma mudança abrupta em sua função de onda, chamada comumente de colapso: o observador vê a carta em um estado clássico definido (com a face para cima ou para baixo) e, a partir desse ponto, somente a parte correspondente da função de onda sobrevive. É como se, com as probabilidades determinadas pela função de onda, a natureza escolhesse um estado ao acaso.

A interpretação de Copenhague produziu uma receita extraordinariamente bem-sucedida para fazer cálculos que descreviam com grande acuidade os dados experimentais, mas não eliminou a suspeita de que alguma equação teria que dizer como e quando o colapso da função de onda ocorria. Para muitos físicos, a ausência dessa equação significava que havia algo intrinsecamente errado com a mecânica quântica e que brevemente ela seria substituída por uma teoria mais fundamental. Por isso, em vez de debater as implicações ontológicas das equações, a maioria dos físicos dedicou-se a suas várias e fascinantes aplicações e aos diversos problemas prementes e ainda não resolvidos da física nuclear.

Essa atitude pragmática foi um sucesso estrondoso. A mecânica quântica mostrou-se de fato eficaz ao prever a antimatéria e entender a radioatividade (levando à energia nuclear); ao dar conta do comportamento de alguns materiais, como os semicondutores, e explicar a supercondutividade; ao descrever interações como as que ocorrem entre a luz e a matéria (levando à invenção do laser) e entre as ondas de rádio e o núcleo (levando à produção de imagens por ressonância magnética). Muitos sucessos da mecânica quântica envolvem sua extensão, a teoria quântica do campo, que constitui o fundamento da física das partículas elementares, desde sua origem até os atuais experimentos de vanguarda relativos aos neutrinos, ao bóson de Higgs e à supersimetria.

Mundos múltiplos

Por volta dos anos cinquenta, já era evidente que os triunfos sucessivos da mecânica quântica não podiam ser frutos de uma teoria improvisada e passageira. Assim, em meados da década, o americano Hugh Everett III, então estudante da Universidade de Princeton, decidiu rever o postulado do colapso em sua tese de doutoramento. Ele levou a idéia quântica até o limite, com a seguinte pergunta: "O que aconteceria se a evolução temporal do universo inteiro fosse sempre unitária?" Afinal, se a mecânica quântica for suficiente para descrever o universo, então seu estado atual pode ser associado a uma função de onda (uma função extraordinariamente complicada). No cenário de Everett, essa função de onda evolui de forma determinista, não deixando nenhum lugar para o misterioso colapso não-unitário ou para Deus jogar seus dados.

Em vez de serem colapsadas pelas medições, as superposições microscópicas se amplificariam rapidamente, até formarem bizantinas superposições macroscópicas. E nossa carta de baralho quântica estaria de fato em dois lugares ao mesmo tempo. Mais ainda: a pessoa que estivesse olhando para a carta entraria numa superposição de dois estados mentais diferentes, cada qual percebendo um dos resultados. Se apostasse dinheiro no palpite de que a carta cairia com a face voltada para cima, acabaria numa superposição de sorriso e cara fechada, pois ganharia e perderia a aposta simultaneamente.

Everett intuiu brilhantemente que os observadores desse determinista, mas esquizofrênico, mundo quântico poderiam perceber a velha e boa realidade com a qual estamos familiarizados. Mais importante: eles perceberiam uma aparente casualidade, que obedeceria a regras probabilísticas perfeitamente definidas

O ponto de vista de Everett, formalmente chamado de formulação do estado relativo, ficou conhecido como a interpretação dos mundos múltiplos da mecânica quântica, porque cada componente da superposição que constitui um observador reconhece ou percebe o seu próprio mundo. Ao remover o postulado do colapso quântico, esse ponto de vista simplifica a teoria subjacente. Mas o preço que se paga pela simplicidade é a conclusão de que essas percepções paralelas da realidade são igualmente reais.

O trabalho de Everett foi ignorado por quase duas décadas. Muitos físicos confiavam que haveria de surgir uma teoria fundamental que mostrasse que o mundo era, afinal de contas, clássico em certo sentido, sem esquisitices do tipo "um corpo poder ocupar dois lugares ao mesmo tempo". Mas toda uma série de novos experimentos iria pôr fim àquela expectativa.

Poderia essa aparente casualidade quântica ser substituída por alguma espécie de quantidade desconhecida inerente às partículas - as chamadas variáveis ocultas? O irlandês John Stewart Bell, um teórico do CERN (o

centro europeu de pesquisas nucleares), mostrou que, nesse caso, certas quantidades, que poderiam ser mensuradas em alguns experimentos difíceis, divergiriam das previsões da teoria quântica padrão. Após vários anos, a tecnologia possibilitou aos pesquisadores realizar esses experimentos e eliminar a possibilidade das variáveis ocultas.

O experimento de "escolha retardada", proposto por um de nós (Wheeler) em 1978 e realizado com sucesso em 1984, demonstrou mais uma característica quântica da realidade que desafia as descrições clássicas: não apenas um fóton pode estar em dois lugares ao mesmo tempo como também o experimentador pode escolher, depois do acontecimento, se o fóton estava em dois lugares ou somente em um.

O experimento simples das duas fendas (no qual luz ou elétrons passam por duas fendas produzindo um padrão de interferência), alçado pelo físico americano Richard Feynman à posição de mãe de todos os efeitos quânticos foi repetido com sucesso utilizando objetos maiores: átomos, pequenas moléculas e, mais recentemente, buckyballs (estruturas formadas por 60 átomos de carbono). Depois dessa proeza, o físico austríaco Anton Zeilinger e seus colaboradores da Universidade de Viena, Áustria, chegaram até a discutir a possibilidade de realizar esse experimento com vírus. Em resumo, o veredicto da experiência é: a esquisitice do mundo quântico é real, gostemos disso ou não.

A censura quântica

O progresso experimental das últimas décadas foi acompanhado de notáveis progressos na compreensão teórica. O trabalho de Everett deixou sem resposta duas perguntas cruciais. A primeira: se o mundo real tem superposições macroscópicas tão bizarras, por que não as percebemos?

A resposta veio em 1970, por meio de um artigo seminal de Heinz Dieter Zeh, da Universidade de Heidelberg, Alemanha. Ele mostrou que a equação de Schrödinger dá origem a um tipo de censura. Esse efeito ficou conhecido como não-coerência, porque uma superposição ideal é tida como coerente. O conceito de não-coerência foi estudado minuciosamente nas décadas seguintes pelo cientista do laboratório de Los Alamos, Wojciech H. Zurek, por Zeh e outros. Eles descobriram que as superposições coerentes persistem somente enquanto permanecem secretas para o resto do mundo. Nossa carta quântica derrubada está sempre recebendo o impacto de enxeridos fótons e moléculas de ar, que podem comprovar se a carta caiu para a direita ou para a esquerda, destruindo dessa forma a superposição e tornando-a inobservável (leia o quadro **A não-coerência: como a quântica se torna clássica**).

É como se o ambiente desempenhasse o papel de observador, causando o colapso da função de onda. Suponha que uma amiga sua olhou a carta e não lhe disse para que lado ela caiu. Pela interpretação de Copenhague, a medição dela colapsa a superposição num resultado definido. E a descrição que você faz da carta muda a superposição quântica para uma representação clássica de sua ignorância quanto ao que ela viu. Falando de forma imprecisa, os cálculos de não-coerência mostram que não é necessário nenhum observador humano (ou o colapso explícito da função de onda) para obter quase o mesmo efeito - uma simples molécula de ar será suficiente. Para todos os fins práticos, essa minúscula interação muda a superposição para a situação clássica num abrir e fechar de olhos.

A teoria da não-coerência explica por que não vemos rotineiramente superposições quânticas no mundo ao redor. Não é por que a mecânica quântica deixe intrinsecamente de funcionar para objetos maiores do que um determinado tamanho mágico. Na verdade, é praticamente impossível manter objetos macroscópicos, como gatos e cartas de baralho, isolados a uma distância que impeça a não-coerência. Objetos microscópicos, ao contrário, são mais facilmente isoláveis de seu ambiente e assim preservam o comportamento quântico.

A segunda pergunta sem resposta no quadro de Everett é mais sutil, porém igualmente importante. Que mecanismo seleciona os estados clássicos (a face para cima ou para baixo de nossa carta de baralho)? Considerados como estados quânticos abstratos, não há nada de especial sobre eles, quando comparados às inúmeras superposições possíveis de "cima" e "baixo" em várias proporções. Por que então os mundos múltiplos se dividem estritamente de acordo com a linha cima/baixo, como nos é familiar, e nunca segundo nenhuma outra opção? A teoria da não-coerência responde também a essa pergunta. Cálculos mostraram que os estados clássicos do tipo "para cima" e "para baixo" são exatamente os que mais resistem à não-coerência. Ou seja, as interações com o ambiente deixariam intocadas as cartas viradas para cima e para baixo, mas levariam qualquer outra superposição para as alternativas clássicas.

Não-coerência e cérebro

Os físicos têm a tradição de analisar o universo dividindo-o em duas partes. Por exemplo, em termodinâmica, os teóricos separam um corpo material de todo o meio que o circunda (o "ambiente") e que provê as condições dominantes de pressão e temperatura. Tradicionalmente, os físicos quânticos separam o sistema quântico do aparato clássico de medição. Se a unicidade e a não-coerência forem levadas a sério, então é instrutivo dividir o

universo em três partes, cada qual descrita por estados quânticos: o objeto em questão, o ambiente e o sujeito o observador (leia o quadro A realidade dividida).

A não-coerência causada pela interação do ambiente com o objeto ou com o observador garante que jamais percebamos superposições quânticas de estados mentais. Mais ainda: o cérebro humano está de tal modo ligado ao ambiente que a não-coerência dos nossos neurônios ativos é inevitável e essencialmente instantânea. Como Zeh enfatizou, essas conclusões justificam a longa tradição dos livros didáticos de usar o postulado do colapso da função de onda como uma receita pragmática do tipo "cale a boca e calcule": compute as probabilidades como se a função de onda entrasse em colapso quando o objeto é observado. Ainda que, segundo Everett, a função de onda tecnicamente nunca entre em colapso, os estudiosos em geral concordam que a não-coerência produz um efeito que tem toda a aparência e o cheiro de um colapso.

A descoberta da não-coerência, combinada com demonstrações experimentais cada vez mais elaboradas da esquisitice quântica, causou uma mudança considerável na perspectiva dos físicos. A motivação principal para a introdução da idéia de colapso da função de onda foi explicar por que certos experimentos produziam resultados específicos e não estranhas superposições de resultados. Agora, grande parte dessa motivação não existe mais. E é também constrangedor o fato de ninguém ter apresentado uma equação determinista e possível de ser testada que especifique exatamente quando o misterioso colapso ocorre.

Uma pesquisa informal realizada em julho de 1999 durante uma conferência de computação quântica no Instituto Isaac Newton em Cambridge, Inglaterra, sugere que o ponto de vista dominante está mudando. De 90 físicos entrevistados, apenas oito declararam que sua concepção inclui explicitamente o colapso da função de onda; 30 optaram pela "teoria dos mundos múltiplos" ou de "histórias consistentes" (sem colapso nenhum) (grosso modo a abordagem das "histórias consistentes" analisa seqüências de medições e coleta pacotes de resultados alternativos que formariam uma "história" consistente para o observador). Mas o quadro ainda não está completo: 50 pesquisadores escolheram a alternativa "nenhuma das anteriores ou indeciso".

Uma confusão lingüística pode ter contribuído para esse número elevado. Não é incomum que dois físicos aleguem professar a interpretação de Copenhague, por exemplo, e discordem sobre o que entendem por ela. Dito isso, a pesquisa sugeriu claramente que já é tempo de atualizar os livros didáticos de física quântica: apesar de esses livros, num capítulo inicial, infalivelmente apresentarem o colapso não-unitário como um postulado fundamental, a pesquisa mostrou que muitos físicos atuais - pelo menos no campo ainda incipiente da computação quântica - não levam a sério esse postulado. A noção de colapso terá por muito tempo ainda grande utilidade como receita de cálculo, mas vale a pena uma palavra de esclarecimento que poupará os estudantes astutos de muitas horas de confusão: essa noção talvez não seja um processo fundamental que viole a equação de Schrödinger.

Previendo o futuro

Depois de cem anos de idéias quânticas, o que resta pela frente? Que mistérios permanecem? Apesar de temas básicos da ontologia e da natureza última da realidade sempre aparecerem em discussões sobre como interpretar a mecânica quântica, a teoria talvez seja só mais uma peça de um enorme quebra-cabeça. As teorias podem ser grosseiramente organizadas como árvores genealógicas, nas quais, pelo menos em princípio, cada ramo deriva de um ramo superior mais fundamental. Quase no topo estão a teoria geral da relatividade e a teoria quântica do campo; no primeiro nível dos descendentes estão a teoria especial da relatividade e a mecânica quântica; destas derivam o eletromagnetismo, a mecânica clássica, a física atômica etc.; disciplinas como a ciência da computação, a psicologia e a medicina aparecem bem abaixo na linhagem.

Todas essas teorias têm dois componentes: equações matemáticas e palavras que explicam como as equações se relacionam com a observação experimental. A mecânica quântica, conforme é geralmente apresentada nos livros didáticos, tem ambos os componentes: algumas equações e três postulados escritos em linguagem corrente. Em cada nível da hierarquia teórica, novos conceitos (por exemplo, prótons, átomos, células, organismos, culturas) são introduzidos, porque capturam convenientemente a essência do que está sendo tratado sem recorrer a teorias superiores. Grosseiramente falando, a quantidade de equações por palavra diminui à medida que se percorre a hierarquia em sentido descendente, ficando próxima de zero em campos de muita aplicabilidade, como a medicina e a sociologia. Em contraste, as teorias próximas do topo são altamente matematizadas, e os físicos ainda lutam para compreender os conceitos que estão codificados nessa matemática.

A finalidade última da física é descobrir o que é jocosamente chamado de "teoria de tudo", da qual todo o resto possa ser deduzido. Se essa teoria existir, ela ocupará o lugar mais alto da árvore, indicando que tanto a relatividade geral quanto a teoria quântica do campo poderiam derivar dela. Os físicos sabem que está faltando alguma coisa no topo da árvore, porque não temos uma teoria consistente que inclua tanto a gravitação quanto a mecânica quântica, embora o universo contenha ambos os fenômenos.

A teoria de tudo provavelmente não teria conceito algum, pois do contrário teríamos que buscar uma explicação para esses conceitos em alguma teoria ainda mais fundamental, o que nos levaria a uma recessão infinita. Em outras palavras, essa teoria teria que ser puramente matemática, sem explicações ou postulados. Talvez um matemático infinitamente inteligente seja capaz de derivar toda a árvore teórica apenas de equações, deduzindo delas as propriedades do universo, de seus habitantes e das percepções que eles têm do mundo.

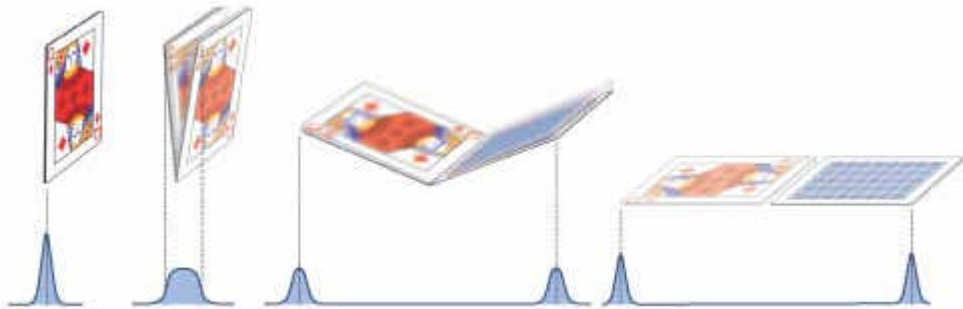
Os primeiros cem anos da mecânica quântica proporcionaram tecnologias poderosas e responderam a muitas perguntas. Mas os físicos levantaram novas questões, tão importantes quanto as pendentes na época do discurso inaugural de Maxwell em Cambridge - questões referentes à gravitação quântica e à natureza última da realidade. Se a história tem algo a nos ensinar, o século que iniciamos deverá estar cheio de excitantes surpresas.



Baralhos quânticos

Uma simples carta de baralho derrubada em princípio leva ao mistério quântico

De acordo com a física quântica, uma carta de baralho hipotética, perfeitamente equilibrada na borda, cairá em duas direções ao mesmo tempo. Isso é conhecido como superposição. A função de onda da carta de baralho (em azul) muda contínua e uniformemente do estado de equilíbrio (esquerda) para o misterioso estado final (direita), em que a carta parece estar em dois lugares ao mesmo tempo. Na prática, esse experimento é impossível com uma carta de verdade. Mas situações análogas foram demonstradas inúmeras vezes com elétrons, átomos e objetos maiores. Entender o sentido dessas superposições e por que nunca as vemos acontecer no mundo cotidiano têm sido o grande mistério da mecânica quântica. Por décadas, os físicos desenvolveram várias idéias para resolver o mistério, entre elas as interpretações rivais de Copenhague, dos mundos múltiplos e da não-coerência.



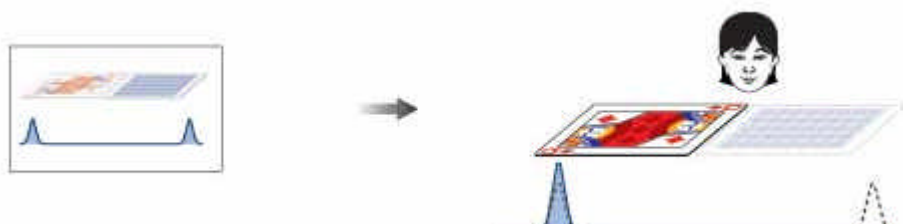
A interpretação de Copenhague

Idéia: Observadores vêem um resultado casual; a probabilidade é dada pela função de onda.

Vantagem: Um único resultado ocorre. Ele coincide com o fenômeno observado.

Problema: É necessário que ocorra o colapso da função de onda, mas nenhuma equação especifica quando.

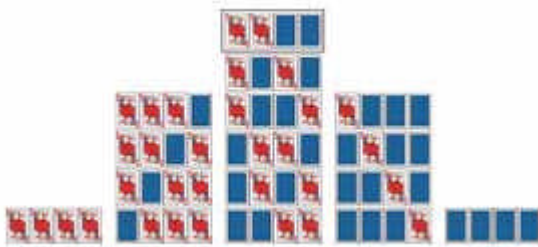
Quando se mede ou se observa uma superposição quântica, o que se vê é uma das alternativas, ao acaso, cujas probabilidades são controladas pela função de onda. Suponhamos que uma pessoa aposte que a carta vai cair com a face voltada para cima. Quando ela olhar para a carta pela primeira vez, terá 50% de chance de ganhar a aposta. Embora essa interpretação já tenha sido pragmaticamente aceita há bastante tempo pelos físicos, ela requer mudança abrupta ou colapso da função de onda, violando a equação de Schrödinger.



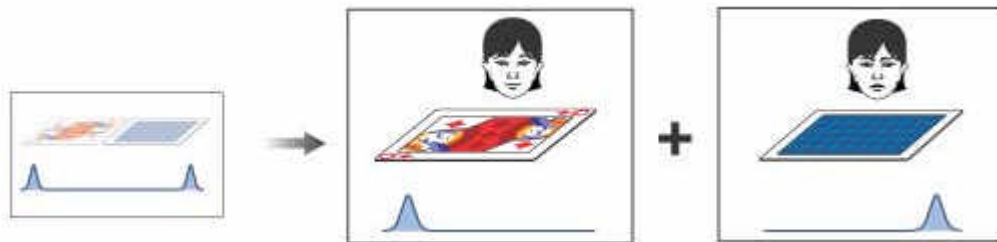
A interpretação dos mundos múltiplos

Idéia: As superposições parecerão mundos alternativos paralelos para seus habitantes.

Vantagem: A equação de Schrödinger funciona sempre; as funções de onda nunca entram em colapso

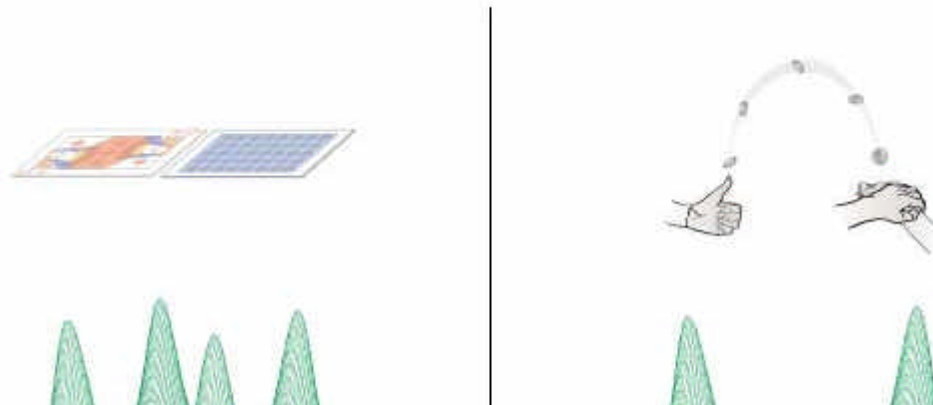


Problemas: A esquisitice da idéia; alguns enigmas técnicos permanecem. Se as funções de onda nunca entram em colapso, a equação de Schrödinger prevê que, ao olhar a superposição das cartas, o próprio observador entre numa superposição de dois resultados possíveis: ganhando e perdendo a aposta simultaneamente. As duas partes da função total de onda (do observador mais a carta) evoluem independentemente, qual dois mundos paralelos. Se o experimento for repetido muitas vezes, as pessoas da maior parte dos mundos paralelos verão a carta cair com a face para cima, na metade das vezes, aproximadamente. As cartas empilhadas à direita mostram 16 mundos resultantes de uma carta derrubada quatro vezes.



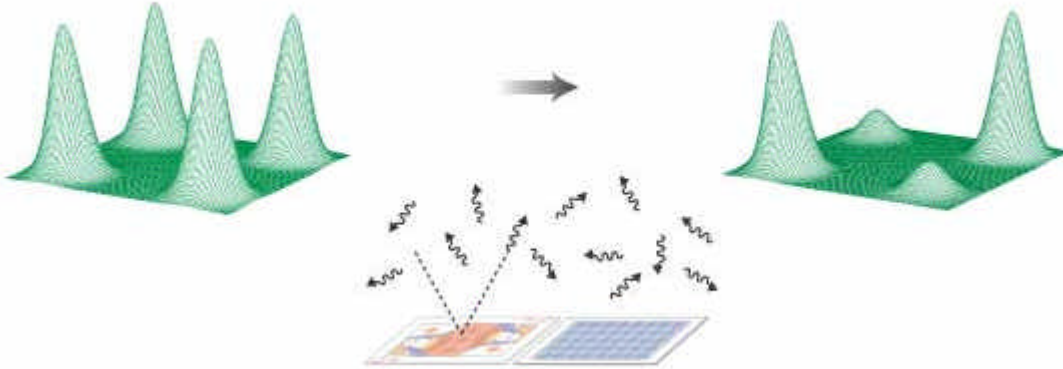
A não-coerência: como a quântica se torna clássica

A incerteza de uma superposição quântica (esquerda) é diferente da incerteza da probabilidade clássica, como ocorre depois de um arremesso de moeda (direita). Um objeto matemático chamado matriz de densidade ilustra a diferença. A função de onda da carta quântica corresponde à matriz de densidade de quatro picos. Dois desses picos representam os 50 por cento de probabilidade de cada resultado, "face para cima" ou "face para baixo". Os outros dois picos indicam que esses dois resultados podem ainda, em princípio, interferir um com o outro. O estado quântico permanece "coerente". A matriz de densidade referente ao arremesso de moeda tem apenas os dois primeiros picos. Isso convencionalmente significa que a moeda caiu de fato na posição cara ou coroa, mas que não olhamos para ela ainda.





A teoria da não-coerência revela que a mais ínfima interação com o ambiente, seja com um simples fóton ou uma molécula de gás, transforma rapidamente uma matriz de densidade coerente em outra que, para todos os fins práticos, representa as probabilidades clássicas, como as do arremesso de moeda. A equação de Schrödinger controla todo o processo.

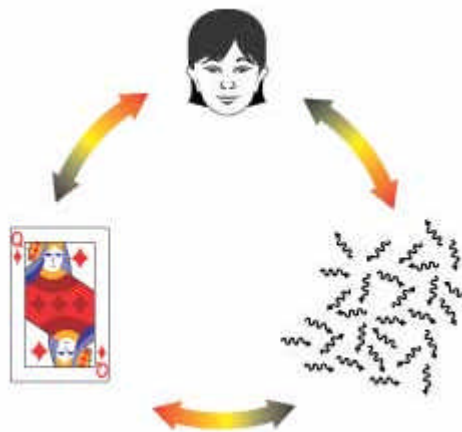


A realidade dividida

É instrutivo dividir o universo em três partes: o objeto sob consideração, o ambiente e o estado quântico do observador ou sujeito. A equação de Schrödinger, que governa o universo como um todo, pode ser dividida em termos que descrevem a dinâmica interna de cada um desses três subsistemas e termos que descrevem as interações entre eles. Qualitativamente esses termos têm efeitos muito diferentes.

O termo que mostra a dinâmica do objeto é tipicamente o mais importante. Então, para representar o que o objeto vai fazer, os teóricos geralmente começam ignorando todos os outros termos. Com relação à nossa carta quântica, sua dinâmica diz que ela cairá para os dois lados, direito e esquerdo, simultaneamente, em superposição. Quando nossa observadora olha a carta, a interação sujeito-objeto estende a superposição ao seu estado mental do sujeito, produzindo a superposição de alegria e desapontamento pelo ganho e perda simultâneos da aposta. A pessoa, no entanto, nunca percebe essa superposição, porque a interação entre o objeto e o ambiente (como, por exemplo, as moléculas de ar e os fótons) provoca uma rápida "descoerência", que torna a superposição inobservável.

Mesmo que ela pudesse isolar completamente a carta do ambiente (por exemplo, realizando o experimento em uma câmara de vácuo escura, no zero absoluto), isso não faria diferença. Quando olhasse a carta, ao menos um neurônio em seus nervos ópticos entraria numa superposição dos estados "ativado" e "não-ativado" e essa superposição seria "descoerenciada" em cerca de 10-20 de segundo, de acordo com cálculos recentes. Se os complexos padrões de ativação dos neurônios em nosso cérebro têm alguma coisa a ver com a consciência e a maneira como formamos pensamentos e percepções, então a "descoerência" de nossos neurônios garante que jamais percebamos superposições quânticas de estados mentais. Em essência, nossos cérebros enredam inextricavelmente o sujeito e o ambiente, forçando em nós a



não-coerência. (M.T. e J.A.W.)

Para saber mais

One Hundred Years of Quantum Physics. Daniel Kleppner e Roman Jackiw, em Science, vol. 289, páginas 893-898, 11 de agosto de 2000.

Beam Line, Special quantum century issue, vol.30, nº 2, 2000. Disponível on-line no endereço www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/pdf/00ii.pdf

Max Planck: the reluctant revolutionary. Helge Kragh, em Physics World, vol.13, nº 12, páginas 31-35, dezembro de 2000.

The quantum centennial. A. Zeilinger, em Nature, vol. 408, páginas 639-641, 7 de dezembro de 2000.

Para mais informações sobre a "**não-coerência**", veja www.decoherence.de

Os autores

MAX TEGMARK e JOHN ARCHIBALD WHEELER discutiram amplamente a mecânica quântica durante três anos e meio, período em que Tegmark fez seu pós-doutorado no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, Nova Jérsei. Atualmente, Tegmark é professor assistente de física da Universidade da Pensilvânia. Wheeler é professor emérito de Princeton. Entre seus ex-alunos, figuram Richard Feynman e Hugh Everett III (criador da interpretação dos mundos múltiplos). Wheeler recebeu o prêmio Wolf de Física de 1997, por seus trabalhos sobre reações nucleares, mecânica quântica e buracos negros. Em 1934 e 1935, teve o privilégio de estudar física nuclear com o grupo de Niels Bohr, em Copenhague. Ao chegar ao instituto, perguntou a um trabalhador, que podava uma trepadeira que se alastrava muro acima, onde poderia encontrar Niels Bohr. "Eu sou Niels Bohr" o homem respondeu.

Os autores agradecem a Emily Bennet e Ken Ford pela ajuda com um antigo manuscrito sobre o assunto aqui tratado, e a Jeff Klien, Dieter Zeh e Wojciech H. Zurek por seus úteis comentários.