

# O que é a mecânica quântica?

A. O. CALDEIRA

oi exatamente em 1900 que Planck teve de lançar mão de uma expressão inusitada para explicar os seus resultados da medida da intensidade da radiação emitida por um radiador

ideal – o corpo negro – levando-o assim a estabelecer o valor de uma nova constante universal que ficou conhecida como *constante de Planck*. A partir daí, e também em função de outras experiências que apresentavam resultados igualmente surpreendentes no contexto da mecânica de Newton e do ele-

**A. O. CALDEIRA**  
é professor do Instituto  
de Física Gleb Wataghin  
(IFGW) da Unicamp.

tromagnetismo de Maxwell, os pesquisadores do começo do século passado se viram obrigados a formular hipóteses revolucionárias que culminaram com a elaboração de uma nova física capaz de descrever os estranhos fenômenos que ocorriam na escala atômica: a mecânica quântica.

Essa teoria, com a sua nova conceituação sobre a matéria e os seus intrigantes postulados, gerou debates não só no âmbito das ciências exatas, mas também no das outras áreas do conhecimento, provocando assim uma grande revolução intelectual no século XX. Obviamente que, além das discussões sérias e conceitualmente sólidas, as características não cotidianas dos fenômenos quânticos levaram muitos pesquisadores, e também leigos, a formular interpretações equivocadas da nova teoria, o que infelizmente, ainda nos nossos dias, atrai a atenção das pessoas menos informadas.

Antes de mais nada, seria pertinente deixar bem claro que a mecânica quântica trata de questões reais relativas a propriedades de sistemas físicos que são mensuráveis em um laboratório. Os seus resultados são precisos e gozam de inquestionável utilidade prática. Só para se ter uma idéia da aplicabilidade dessa teoria, podemos mencionar que dela dependem o nosso aparelho de CD, o controle remoto de nossas TVs, os aparelhos de ressonância magnética em hospitais ou até mesmo os já tão populares microcomputadores. Todos os dispositivos eletrônicos usados nos equipamentos da chamada *tecnologia de ponta* só puderam ser projetados porque conhecemos a mecânica quântica. A título de informação, 30% do PIB americano é devido a essas tecnologias.

Esperando ter convencido o leitor de que estamos longe do terreno da especulação, vamos, então, abordar a questão principal deste artigo. O que é a mecânica quântica?

A mecânica quântica é a teoria que descreve o comportamento da matéria na escala do “muito pequeno”, ou seja, é a física dos componentes da matéria; átomos, moléculas e núcleos, que por sua vez são compostos pelas partículas elementares. Mas de que forma essa nova teoria difere daquelas já existentes antes da virada do século XX e que tão bem descrevem os fenômenos físicos do nosso cotidiano?

A fim de poder apreciar as novidades que a física quântica pode nos proporcionar, vamos estudar duas experiências clássicas no assunto. Porém, tentaremos adaptá-las a situações do nosso dia-a-dia de onde possamos extrair uma terminologia não-técnica e, com isso, aguçar o interesse do leitor que não seja especialista em física. Portanto, estaremos falando de realizações fictícias, e algumas grandezas que usaremos nos nossos exemplos não representam de fato uma situação real.

Os objetos que conhecemos no nosso universo macroscópico são descritos por um conjunto de propriedades que estão sujeitas a um processo contínuo de observação. Por exemplo, a posição, a velocidade e a

temperatura de um corpo em movimento. Entretanto, na mecânica quântica o que ocorre não é bem assim. Uma peculiaridade da nova teoria reside na própria descrição do sistema físico de interesse. Há propriedades de um dado sistema cujos valores não podem ser conhecidos ao mesmo tempo. Por exemplo, um determinado objeto não pode ter a sua posição e a sua velocidade simultaneamente conhecidas na física quântica (*princípio da incerteza*). Quando isso ocorre, as grandezas são ditas *incompatíveis*. Os chamados sistemas quânticos são descritos por objetos matemáticos que carregam a informação máxima sobre os possíveis resultados de observações (medidas) de grandezas que venham a ser feitas no sistema e, dependendo da situação, não há como prever qual será o resultado de uma determinada observação no sistema.

Vamos tentar exemplificar o exposto acima com uma experiência fictícia que descrevemos a seguir. Suponhamos que um determinado objeto seja dotado de cor, vermelho ou azul, e que possa ou não emitir som. A experiência real seria equivalente a se observar *só a cor* ou detetar *só o som* do objeto. Os aparelhos de medida são, nesse caso, os nossos sensores naturais: olhos e ouvidos. Assim, quando testamos se o objeto é ou não sonoro devemos estar vendados, enquanto para observar a cor do objeto teremos os ouvidos tampados. É importante salientar que se não estivermos observando, ou mesmo nos preparando para observar, qualquer propriedade do sistema não poderemos fazer qualquer previsão sobre o que ele é. Dizer que há chance de o objeto ser azul ou vermelho já implica a montagem da medida de cor, o mesmo ocorrendo no caso do som.

Comecemos, então, a nossa experiência. Inicialmente consideremos que o sistema obedeça às leis da *física clássica*. A sequência de observações segue a ordem: visão, visão, audição, audição e visão. Após a primeira observação, suponhamos que a cor azul tenha sido detetada. No segundo passo observamos de novo a cor do objeto e o resultado é, novamente, azul. No terceiro passo teremos os olhos vendados, mas

poderemos ouvir se o objeto emite som ou não. Vamos supor que nessa etapa ele emita som. Na quarta etapa o resultado é naturalmente que o objeto é sonoro. Finalmente chegamos à quinta etapa. Bem, o leitor não se surpreenderia se voltássemos a observar que o objeto é azul e é isso o que ocorre no último passo da nossa seqüência de medidas. Nada muito excitante até o momento.

Vamos agora refazer a mesma experiência com um *sistema quântico*. Os passos são os mesmos, assim como os resultados obtidos, exceto na última etapa, quando existe a possibilidade de o sistema apresentar a cor vermelha! Reparemos que no segundo passo o sistema mostrou a cor azul, mas, após testarmos a sua capacidade sonora, perdemos, por completo, a informação sobre a sua cor. O mesmo ocorreria para o som se invertêssemos as medidas de visão e audição.

Nessa nossa experiência fictícia som e cor fazem o papel de grandezas *incompatíveis* e não podem ser medidas simultaneamente. As grandezas *compatíveis* são as que podem ser medidas simultaneamente e agem como as do sistema clássico apresentado na primeira experiência acima.

A questão torna-se, então, como descrever precisamente um sistema quântico. Se vamos observar a cor de um objeto sonoro, o máximo que podemos dizer é que há diferentes probabilidades de o objeto se mostrar azul ou vermelho. Entretanto, uma vez observado, o sistema estará, com certeza, com uma ou outra cor, ou seja, o sistema *colapsa* em uma das possíveis alternativas. Se, em seguida, medirmos o som do objeto, a alternativa de cor obtida anteriormente passará a representar as possíveis alternativas de som do objeto. A essa situação exótica daremos o nome de *sobreposição de alternativas*. Convém notar que essa situação não corresponde de maneira alguma a uma mera mistura de alternativas com diferentes probabilidades para cada uma delas. As *alternativas coexistem* e o sistema só decide por qual delas optar durante o processo de medida!

Outro ponto importante é que, apesar de termos introduzido grandezas com apenas

dois possíveis resultados de medida, essa não é a regra geral em mecânica quântica, apesar do crescente interesse nesses sistemas, como veremos mais adiante. As grandezas dos sistemas quânticos podem assumir um número discreto, finito ou infinito, ou até mesmo contínuo de resultados nos processos de medida.

A segunda questão que desde a criação da mecânica quântica fascina os seus adeptos é a chamada *dualidade partícula-onda*. Para entender o que isso significa não podemos evitar introduzir alguns conceitos que, apesar de técnicos, são bem intuitivos.

O primeiro conceito é o de *partícula*. Para nós esse termo significa um objeto que possui massa e é extremamente pequeno, como uma minúscula bolinha de gude. É um conceito com o qual estamos bem acostumados porque lidamos diariamente com objetos dotados de massa e que ocupam uma certa região do espaço.

O segundo conceito é o de *onda*. Este, apesar de ser também observado no nosso dia-a-dia, escapa à atenção de muitos de nós. Um exemplo bem simples do movimento ondulatório é o das oscilações da superfície da água de uma piscina. Se mexermos sistematicamente a nossa mão sobre essa superfície, observaremos uma ondulação se afastando, igualmente em todas as direções, do ponto onde a superfície foi perturbada.

O caso particular aqui mencionado é o de *onda material*, ou seja, aquela que precisa de um meio material para se propagar (a água da piscina, no nosso caso). Entretanto, esse não é o caso geral. Há ondas que não precisam de meios materiais para a sua propagação, como é o caso da *radiação eletromagnética*. Aqui, a *energia* emitida por cargas elétricas aceleradas se propaga no espaço vazio (o vácuo) como as ondas na superfície da piscina.

Apesar da sua origem mais sutil, a radiação eletromagnética está também presente na nossa experiência diária. Dependendo da sua freqüência ela é conhecida como onda de rádio, FM, radiação infravermelha, luz visível, raios-X e muito mais.

Pois bem, até o final do século XIX tudo o que era partícula tinha o seu movi-

mento descrito pela mecânica newtoniana, enquanto a radiação eletromagnética era descrita pelas equações de Maxwell do eletromagnetismo. O que ocorreu no primeiro quarto do século XX foi que um determinado conjunto de experiências apresentou resultados conflitantes com essa distinção entre os comportamentos de onda e de partícula. Esses resultados podem ser resumidos em uma única experiência que passamos a descrever em seguida na sua *versão clássica*.

Vamos supor que uma pequena partícula seja enviada através de um tubo que a partir de um ponto se bifurca criando duas opções de saída. Um pouco adiante das duas saídas existe uma seqüência de pequenas caixas numeradas, cada qual podendo alojar apenas uma partícula. As caixas são colocadas lado a lado, como mostra a figura abaixo, onde apenas 8 delas são mostradas.

O resultado obtido é que a partícula sai pela opção superior ou pela inferior e, consequentemente, aloja-se na caixa disposta frontalmente à saída usada. Com a numeração que usamos, as caixas seriam as de números 3 ou 7.

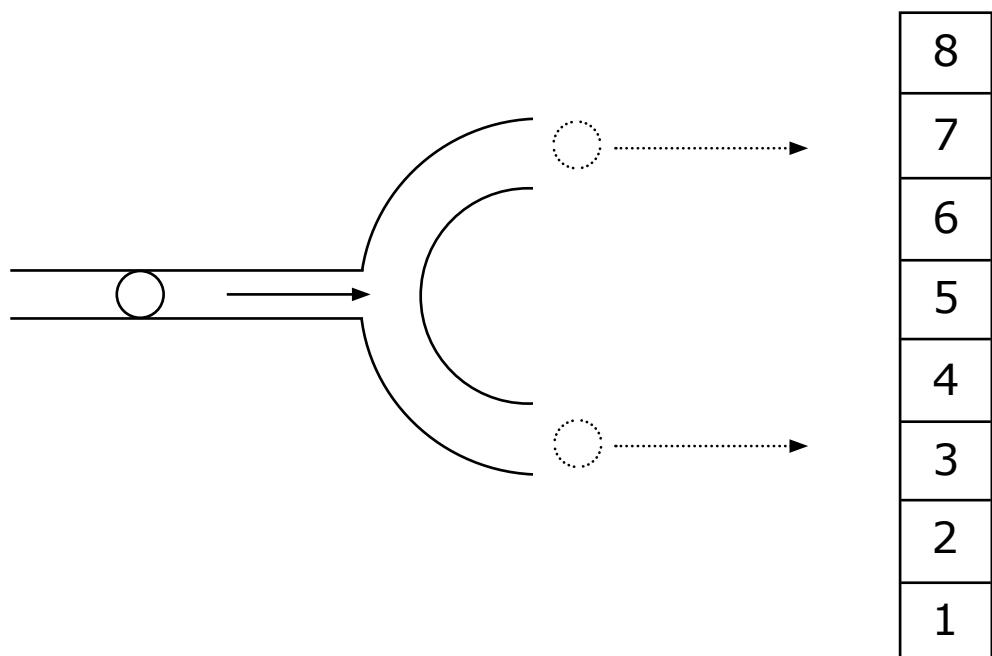
Suponhamos ainda que essa mesma experiência seja realizada em várias cidades,

sob as mesmas condições, e que o observador marque o número da caixa atingida pelo projétil. Devemos notar que não há qualquer influência entre duas dadas experiências realizadas em cidades diferentes.

Depois de realizadas todas as experiências, os resultados coletados são comparados e não há qualquer surpresa ao constatarmos que, praticamente, na metade dos casos as caixas de número 3 foram atingidas, enquanto na outra metade os projéteis terminaram na caixa 7.

Analisemos, agora, o que ocorre com a experiência equivalente para uma *partícula quântica*.

Novamente os observadores estão em cidades diferentes e o procedimento é o mesmo que o anterior. Em cada localidade a partícula atinge uma dada caixa cujo número é anotado e enviado para que seja comparado com os das outras cidades. Surpreendentemente, ao comparar as anotações dos observadores constatamos que, por exemplo, se 100 experiências foram realizadas, cinqüenta caixas ímpares foram atingidas apenas duas vezes cada! A chance de o projétil quântico atingir uma determinada caixa ficou completamente deslocalizada.



Mais intrigante ainda é o resultado obtido ao perguntarmos por qual das duas saídas a partícula passou. Qualquer experiência que nos dê essa resposta nos remete ao resultado clássico. Se tamparmos uma da saídas, a superior, por exemplo, apenas a caixa de número 3 será atingida em todas as experiências.

O comportamento descrito acima, entretanto, não é desconhecido na física clássica. Se repetirmos a mesma experiência usando luz ao invés de uma partícula e substituirmos as caixas por uma placa fotossensível, observaremos que a luminosidade na placa apresenta o padrão mostrado na figura ao lado. Esse é o conhecido fenômeno de *interferência* que é característico de *ondas*! Quando ondas de qualquer origem são enviadas através de duas fendas, as ondas resultantes de cada uma delas podem se somar ou se subtrair causando assim o efeito de interferência. Se tamparmos uma das fendas, as franjas desaparecerão e apenas uma estreita região do anteparo, a mais frontal à fenda aberta, ficará iluminada.

Voltemos, então, para a nossa experiência com as partículas quânticas. Comparando os resultados obtidos com os de uma experiência clássica com a luz, somos levados a imaginar que o corpúsculo quântico deva ser descrito por uma onda. Só assim poderíamos entender como caixas distantes das saídas poderiam ser atingidas pelas partículas e, ainda mais, de forma alternada. Por outro lado, uma onda clássica se espalha por todo o espaço enquanto a partícula é detetada em uma dada caixa. Então, de que onda estamos falando?

Para responder a essa questão devemos nos lembrar que a interpretação da experiência do corpúsculo quântico como a de interferência de ondas dá-se através das suas inúmeras realizações em diferentes localidades. É a coleção dos números das caixas atingidas que obedece a um padrão de interferência. Aqui entra naturalmente o ingrediente estatístico da mecânica quântica. A onda à qual nos referimos é uma onda probabilística. O que se espalha pelo espaço é, de fato, a alternativa da partícula estar em uma dada posição. Dessa forma, a



partícula que atinge uma certa caixa apresenta essa alternativa como consequência da interferência das alternativas dela ter passado por uma ou outra opção de saída. Novamente podemos evocar a nossa já conhecida *sobreposição de alternativas* à qual estará ligada a probabilidade de se encontrar a partícula em uma determinada caixa. A essa característica do objeto de se comportar ora como partícula ora como onda dá-se o nome de *dualidade partícula-onda*.

Por outro lado vimos que a tentativa de determinar por onde passa a partícula destruiu as suas propriedades ondulatórias. Na realidade qualquer experiência que seja montada para identificar uma das duas características do objeto necessariamente destrói a outra. Esse é o chamado *princípio da complementaridade*.

Obviamente poderíamos mencionar vários experimentos que evidenciam o comportamento quântico de diferentes sistemas físicos, mas acreditamos que as duas experiências fictícias que aqui apresentamos sejam genuínas portadoras de toda a sutileza conceitual presente na mecânica quântica.

A aplicação dessa teoria a problemas

nas escalas atômicas e subatômicas apresenta inúmeros resultados sem equivalentes clássicos. Dentre eles podemos mencionar a *quantização da energia* e o *tunelamento quântico*, que passaremos a discutir sucintamente em seguida.

A quantização da energia significa que determinados sistemas possuem alternativas específicas como resultados da medida da energia neles contida. A cada alternativa corresponde um determinado valor da energia do sistema. Vamos tentar exemplificar o que dissemos com uma situação simples.

Desejamos imprimir movimento a um bloco preso a uma mola. A física clássica nos diz que para tanto precisamos apenas dar um pequeno empurrão no bloco que subseqüentemente ficará oscilando com uma energia que depende do quanto forte tenha sido o empurrão. Na mecânica quântica a situação não é tão simples. Quando tratamos o equivalente quântico desse sistema, o que faz o papel do “empurrão” é a interação do sistema com algum agente externo que lhe fornece energia. O surpreendente é que a absorção da energia desse agente externo se dá através de quantidades discretas, os *quanta* de energia, e não de forma contínua como na física clássica. Uma das razões pelas quais não conseguimos dar conta da existência do *quantum* de energia nos sistemas do nosso cotidiano (ver discussão abaixo) é que o seu valor é extremamente pequeno se comparado aos valores de energia com que lidamos no mundo macroscópico.

O tunelamento quântico está intimamente ligado à natureza ondulatória da mecânica quântica e é um dos fenômenos que mais intrigam aqueles que iniciam os seus estudos nessa disciplina.

Consideremos novamente o bloco ligado a uma mola. Nessa nova situação considere que o arranjo está sobre uma mesa e o bloco bem próximo da sua borda. Há duas situações de equilíbrio para esse sistema. Na primeira, o bloco encontra-se sobre a mesa e a mola não está alongada. Na segunda, o bloco está pendurado a uma determinada altura e a mola encontra-se distendida. A física clássica nos diz que se o bloco está na primeira situação de equilíbrio e nada o

perturba ele permanecerá indefinidamente nessa posição, uma conclusão que não nos causa espanto. Entretanto, a física quântica apresenta uma previsão fascinante. Se esperarmos por um tempo longo o suficiente veremos o bloco movimentar-se repentinamente em torno da segunda posição de equilíbrio! É como se o bloco atravessasse uma região que, em termos energéticos, seria classicamente proibida e magicamente se materializasse em torno da outra posição de equilíbrio. Devemos enfatizar que o “bloco quântico” não é exatamente um objeto macroscópico. Se essa experiência for feita com objetos do nosso dia-a-dia, o tempo que deveremos esperar pelo tunelamento será praticamente infinito.

O mais interessante é que a mecânica quântica descreve, com sucesso, o comportamento da matéria desde altíssimas energias (física das partículas elementares) até a escala de energia das reações químicas ou, ainda, de sistemas biológicos. O comportamento termodinâmico dos corpos macroscópicos, em determinadas condições, requer também o uso da mecânica quântica.

A questão que nos resta é, então: por que não observamos esses fenômenos no nosso cotidiano, ou seja, com objetos macroscópicos? Bem, há duas razões para isso.

A primeira é que a constante de Planck é extremamente pequena, o que faz com que as grandezas do universo quântico sejam muito menores que as mesmas grandezas na escala macroscópica. Baseados nesse fato, podemos inferir que os efeitos devidos ao valor não-nulo dessa constante ficarão cada vez mais imperceptíveis à medida que aumentarmos o tamanho dos sistemas, como mencionamos nos dois exemplos acima.

Em segundo lugar, há o chamado efeito de *descoerência*. Esse efeito só recentemente começou a ser estudado e trata do fato de não podermos separar perfeitamente um corpo macroscópico do meio onde ele se encontra. Assim, o meio terá uma influência decisiva na dinâmica do sistema, fazendo com que as condições necessárias para a manutenção dos efeitos quânticos desapareçam em uma escala de tempo extremamente

curta. Na prática, essa destruição dos efeitos quânticos surge quando uma *sobreposição de alternativas* se transforma em simples *mistura de alternativas*.

Entretanto, as novas tecnologias de manipulação dos sistemas físicos nas escalas micro ou até mesmo nanoscópicas nos permitem fabricar dispositivos que apresentam efeitos quânticos envolvendo, coletivamente, um enorme número de partículas. Nesses sistemas a descoerência, apesar de ainda existir, tem a sua influência um pouco reduzida, o que nos permite observar os efeitos quânticos durante algum tempo.

Uma aplicação importante para alguns desses dispositivos seria a construção de *computadores quânticos*. Como vimos no começo deste artigo, há sistemas quânticos cujas grandezas que os representam nos fornecem apenas dois resultados quando observadas. Esses sistemas podem ser usados como *sistemas binários quânticos*, os chamados *qubits*, e, se considerados em grande número, podem funcionar como *processadores quânticos*. Nessa situação, a minimização dos efeitos da descoerência é altamente desejável pois, caso contrário, esses processadores em nada iriam diferir dos processadores clássicos.

Como podemos ver, tudo indica que a mecânica quântica seja a teoria correta

para descrever os fenômenos físicos em qualquer escala de energia. O universo macroscópico só seria um caso particular para o qual há uma forma mais eficiente de descrição: a mecânica newtoniana. Esta pode ser obtida como um caso particular da mecânica quântica mas a recíproca não é verdadeira.

Neste artigo usamos a chamada *interpretação ortodoxa ou de Copenhagen* da mecânica quântica, mas gostaríamos de novamente enfatizar que as experiências aqui apresentadas não correspondem a situações reais. Elas representam uma versão bem simplificada, e até mesmo imprecisa, daquelas que elas tentam imitar. A razão de termos optado por esta abordagem foi fazer com que termos técnicos não fossem uma barreira para os não especialistas no assunto.

Muitos autores, por não se sentirem confortáveis com a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, tentam criar teorias alternativas para substituí-la. Entretanto, cabe notar que, apesar da sua estranheza, a mecânica quântica não apresentou qualquer falha desde que foi elaborada na década de 20 do século passado. Portanto, não há qualquer resultado experimental que aponte a direção onde devemos buscar as evidências para substituir a mecânica quântica por uma nova teoria.