

A EMERGÊNCIA NA FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA E AS QUEBRAS ESPONTÂNEAS DE SIMETRIA

Eduardo Miranda

Considere uma garrafa de vinho que repousa de pé em uma mesa. O fundo da garrafa é mais alto no meio do que nas bordas e apenas estas estão em contato com a superfície da mesa. É praticamente impossível equilibrar uma pequena bola de gude dentro da garrafa no ponto central do seu fundo. Se tentarmos fazê-lo, a bola certamente rolará para a posição mais baixa das bordas, onde ela finalmente repousará. Se formos extremamente cuidadosos em posicionar a bola exatamente no centro, não sabemos prever em que direção ela rolará nem onde terminará. O formato do fundo é perfeitamente simétrico e não favorece nenhuma direção em particular, todas são equivalentes. No entanto, a bolinha irá “escolher” uma direção para rolar entre todas aquelas disponíveis (1). Se descrevemos as diversas direções pelos pontos cardeais, sabemos que a posição final da bola de gude pode apontar para o norte ou para o sul, para sudoeste ou nordeste, de fato para qualquer direção. Esse exemplo mostra de maneira quase banal o fenômeno que os físicos chamam de “quebra espontânea de simetria”. A simetria está no fato de que todas as posições das bordas que tocam a mesa são equivalentes, não havendo preferência por nenhuma delas em particular. Essa simetria, no entanto, não é refletida na posição final de equilíbrio da bola de gude, que irá sempre estacionar em uma direção muito bem definida, por exemplo noroeste. A simetria da garrafa foi quebrada pela posição final de equilíbrio da bolinha. Embora ilustrada aqui num contexto cotidiano, a quebra espontânea de simetria é um das manifestações mais importantes do comportamento emergente da matéria.

Uma propriedade é chamada de emergente se ela só ocorre quando há um número muito grande de partículas envolvidas. Aprendemos na escola que a matéria se apresenta em três fases distintas: gás, líquido ou sólido. O comportamento da matéria é, na verdade, muito mais rico do que essa classificação sugere, mas vamos aceitar provisoriamente essa simplificação útil. Tome a água, por exemplo, que pode se apresentar como líquida, como vapor d’água ou como gelo. Podemos nos perguntar em que fase se encontra uma única molécula de água. A resposta correta é que a pergunta não faz sentido quando formulada a respeito de uma molécula individual. Na verdade, essas três fases da matéria só ganham algum sentido quando falamos de uma quantidade macroscópica (2) de moléculas de água: é uma propriedade emergente. Apenas nesse caso podemos observar que o vapor d’água ocupa todo o espaço do recipiente que o contém (característica de um gás), ou que a água “molha” as superfícies que ela toca (propriedade dos líquidos), ou ainda que o gelo apresenta a rigidez típica de um sólido.

A natureza é pródiga na diversidade das propriedades emergentes. Cada uma delas é caracterizada por um comportamento macroscópico bem definido e único. Listemos algumas delas juntamente com algumas de suas propriedades mais distintas:

1. Os magnetos (como os ímãs de geladeira ou a própria Terra), que apresentam polos magnéticos bem definidos (chamados comumente de Norte ou Sul).
2. Os superfluidos (como o elemento Hélio quando resfriado a baixas temperaturas), que podem fluir por tubos estreitos sem nenhuma resistência (ou seja, têm viscosidade zero) e têm condutividade térmica infinita (são condutores perfeitos de calor).
3. Os supercondutores (como alguns compostos metálicos quando resfriados suficientemente), que conduzem corrente elétrica sem nenhuma perda de energia (em outras palavras, tem resistência elétrica exatamente igual a zero) e expulsam completamente os campos magnéticos (o que pode ser usado para “levitar” magnetos).
4. A própria matéria sólida, cujos átomos apresentam uma estrutura periódica que chamamos de cristal (com exceção dos vidros, que não têm essa ordem periódica interna).
5. Os cristais líquidos, que estão por trás da operação das telas LCD (*Liquid Crystal Display*) de nossos computadores, televisores e celulares. Os cristais líquidos têm a propriedade de fluir como os líquidos convencionais, mas, diferentemente destes, as compridas moléculas daqueles se orientam em direções preferenciais (quebrando a simetria de orientação espacial). As próprias membranas celulares também são exemplos de cristais líquidos.

Como quebras espontâneas de simetria e outras propriedades emergentes são geralmente acompanhadas do aparecimento de propriedades bastante não usuais das substâncias, existe um grande potencial para aplicações tecnológicas desses fenômenos. A explosão da capacidade de armazenamento de dados digitais observada nos últimos 30 anos foi consequência da descoberta de um efeito ligado aos estados dos magnetos já mencionados (a chamada magnetorresistência gigante). Já mencionamos também as telas LCD. A lista de aplicações é grande e tende a aumentar à medida que novas descobertas são feitas.

A utilidade da formação de padrões altamente simétricos não foi desprezada pela natureza na evolução dos seres vivos. A diversidade impressionante das cores das asas iridescentes dos besouros foi o resultado, ao que tudo indica, de grandes pressões evolutivas ao longo da história de sua diferenciação. Essas cores são o resultado da reflexão da luz incidente por arranjos ordenados das mais diversas maneiras e presentes nas asas desses insetos (3). Esses chamados cristais fotônicos, descobertos e estudados intensamente pelos cientistas nos últimos anos, apareceram espontaneamente na história evolutiva.

Nem todo comportamento emergente está associado a uma quebra espontânea de simetria. Entretanto, cada uma das fases de matéria da lista acima (e muitas outras) está associada com uma quebra espontânea de simetria. Em alguns casos, descobrir qual simetria foi quebrada representou o passo crucial para o entendimento do fenômeno observado. Isso foi especialmente dramático no caso da

supercondutividade: sua descoberta experimental ocorreu em 1911, mas a natureza da simetria quebrada e a explicação completa do fenômeno só vieram a ser elucidadas em 1957!

É interessante tentar entender como quebras espontâneas de simetria ocorrem na prática. Considere uma substância qualquer em sua fase líquida a uma certa temperatura e pressão. Suas moléculas não têm nenhum arranjo espacial preferencial e podem ocupar qualquer posição na região ocupada pelo líquido. A ausência de posições privilegiadas é uma simetria do sistema no seu estado líquido. Tentando raciocinar por analogia com a bolinha de gude no interior da garrafa de vinho, podemos pensar que a agitação térmica mantém a bolinha em constante movimento e ela nunca consegue ficar parada numa posição fixa. À medida que abaxamos a temperatura, o líquido tornar-se-á sólido. Nesse momento, cada molécula da substância ficará “congelada” numa posição espacial bem definida e o arranjo de todas as moléculas será, na maioria das vezes, um arranjo periódico cristalino. Isso acontece porque (i) um arranjo periódico representa a situação de mais baixo custo energético entre todas as disposições espaciais possíveis e (ii) a agitação térmica não é suficientemente grande para manter as moléculas em movimento aleatório e retirá-las das posições fixas. Na competição entre a tendência de ordenamento periódico, que abaixa a energia do sistema, e a tendência à desordem térmica, a primeira sai vencedora. A simetria inicial foi quebrada, pois nem todas as posições são agora possíveis. Essa quebra espontânea de simetria é acompanhada, como sabemos, de mudanças qualitativas no comportamento da substância. Por exemplo, ela deixa de fluir e torna-se rígida. No análogo da bolinha de gude na garrafa de vinho, quando a agitação térmica é suprimida, a bolinha rapidamente encontra sua posição de mais baixa energia nalgum ponto da borda. De fato, todas as quebras espontâneas de simetria da lista de comportamentos emergentes acima ocorre por uma imposição da necessidade de se encontrar uma configuração de energia mais baixa numa situação de pouca agitação térmica.

Como já enfatizado anteriormente, quebras espontâneas de simetria (e outras propriedades emergentes) só ocorrem em um sistema composto por um número grande de partículas ou partes. No caso da solidificação que discutimos, é preciso um grande número de moléculas para que um sistema possa passar de líquido para sólido. Se tivermos apenas um número pequeno de moléculas, a agitação térmica sempre terminará por “chutar” uma molécula para fora de sua posição fixa e o sistema não terá uma estrutura cristalina estável. A questão relevante, do ponto de vista da estabilidade de uma fase com simetria quebrada espontaneamente, é o tempo necessário para a estrutura ser destruída. Se o número de partículas envolvidas é pequeno, esse tempo é muito curto. Aprendemos na escola que a molécula de amônia (NH_3) tem uma estrutura de uma pirâmide de base triangular, com o átomo de nitrogênio no ápice e os três átomos de hidrogênio nos vértices do triângulo da base. Foi-nos ensinado que essa estrutura é estável e não varia com o tem-

po. Essa estrutura apresenta uma simetria quebrada, com os átomos assumindo posições bem definidas no espaço. Na realidade, não é bem assim. Observa-se experimentalmente que o átomo de nitrogênio, na verdade, oscila ao longo do eixo da pirâmide. Se o triângulo formado pelos átomos de hidrogênio estiver num plano horizontal, por exemplo, a pirâmide pode apontar para cima (com o átomo de nitrogênio acima do plano) ou para baixo (com o nitrogênio abaixo do plano). O tempo durante o qual o nitrogênio “permanece” numa das duas posições é da ordem de uns poucos pico-segundos (um pico-segundo é um bilionésimo de segundo) (4). Esse tempo pode parecer muito pequeno mas, para vários processos subatômicos, ele pode ser considerado razoavelmente longo.

À medida que o tamanho do sistema aumenta, entretanto, esse tempo também aumenta. Idealmente, apenas um sistema infinito mantém uma estrutura de simetria quebrada eternamente. Entretanto, na prática, não é necessário um número tão grande de constituintes básicos para que o tempo de destruição da estrutura ordenada já fique maior do que os tempos usuais de observação humana. Em moléculas maiores, constituídas por um grande número de átomos, estes acabam assumindo posições espaciais bem definidas por tempos macroscópicos e, para todos os efeitos práticos, a simetria pode ser considerada como realmente quebrada.

Há alguns exemplos importantes em moléculas biológicas de que a natureza “preferiu” quebrar certas simetrias. Embora várias moléculas da natureza apresentem simetria quiral, isso não é observado em todas elas. A simetria quiral ou de quiralidade existe quando a molécula e sua imagem refletida num espelho podem ser superpostas uma na outra. A molécula de amônia discutida acima tem simetria quiral. Uma mão humana direita tem como imagem especular uma mão esquerda e

esta não pode ser superposta à primeira. As mãos quebram a simetria de quiralidade e por isso são chamadas de quirais, enquanto que a amônia é uma molécula aquiral. De fato, a origem da palavra *quiral* é a palavra grega para *mão*. É possível classificar as moléculas quirais, por referências às mãos, como sendo quirais à direita ou à esquerda.

Como dito, nem toda molécula é aquiral. A forma natural do açúcar é quiral, assim como os aminoácidos, os elementos constituintes das proteínas. Se produzirmos artificialmente essas substâncias no laboratório, a partir de seus elementos constituintes, obteremos uma mistura com quantidades iguais de moléculas quirais à esquerda e à direita. Entretanto, é interessante que praticamente todos os aminoácidos naturais têm a mesma quiralidade (são quirais à esquerda) e o mesmo se aplica aos vários tipos de açúcares (que são quirais à direita). A seleção natural favoreceu a quebra da simetria de quiralidade. Há ainda uma certa controvérsia sobre se essa quebra espontânea de quiralidade observada nos seres vivos foi resultado de puro acaso (seria como a bolinha de gude que é colocada ligeiramente fora do centro por uma flutuação térmica pequena), tendo sido perpetuada no processo de reprodução, ou se foi o resultado da ação de algum agente externo. Um dos candidatos a esse agente externo

**NEM TODO
COMPORTAMENTO
EMERGENTE ESTÁ
ASSOCIADO À
UMA QUEBRA
ESPONTÂNEA DE
SIMETRIA**

seria a luz das estrelas, que é parcialmente polarizada e, portanto, poderia produzir moléculas com quiralidade. Qualquer que seja o caso, é certo que o caráter quiral das proteínas tem um papel relevante em alguns processos biológicos (uma enzima quiral distingue entre dois substratos com quiralidades opostas, mas iguais em todos os outros aspectos).

Podemos ir além e perceber que o próprio código genético, base de toda a vida, envolve de maneira crucial uma quebra de simetria. A sequência bem definida de bases nitrogenadas do código genético (A, C, T ou G) representa uma quebra em relação à situação completamente simétrica, em que as quatro letras se distribuem de forma completamente aleatória (como as moléculas de um líquido ou um gás). A simetria quebrada na sequência do DNA contém a informação genética da vida. A distribuição completamente aleatória das bases não conteria essencialmente nenhuma informação e seria inútil do ponto de vista evolutivo. De fato, pode-se descrever o aparecimento da vida através da seleção natural como uma quebra espontânea da simetria sequencial do DNA. O fato de que essa quebra levou tanto tempo para se fixar e se reproduzir mostra que ela teve que vencer enormes barreiras de “agitação térmica”. Uma vez estabelecida, entretanto, seu tempo de estabilidade tem se mostrado bastante longo. Mas será infinito?

As propriedades emergentes suscitam também questões de natureza filosófica [ver, por exemplo, (5;6)]. Podem-se notar (pelo menos) duas escolas que diferem na visão do caminho a ser seguido na busca do conhecimento científico, principalmente na física. A primeira, chamada de reducionista, privilegia a busca pelos menores elementos que formam o universo conhecido e pelas leis dinâmicas que os regem. Usualmente associada à física das partículas elementares, essa visão tem origem no atomismo filosófico. Sua premissa básica é a suposição de que o universo é formado por um número pequeno de “objetos fundamentais” a partir dos quais todo o resto é formado. No âmbito da física atual, essa visão é consagrada no chamado modelo padrão das partículas elementares e suas interações. Nele, os objetos fundamentais são os quarks (que formam os prótons e nêutrons), os léptons (como os elétrons e neutrinos) e os bósons de “gauge” (como as partículas de luz, os fótons). Esses objetos básicos interagem entre si através de leis que podem ser formuladas de maneira simples. A pesquisa, na visão reducionista, é sempre direcionada na busca por objetos mais básicos (“mais fundamentais”, no jargão) e na formulação de suas leis dinâmicas. Sua forma atual, o modelo padrão, é extremamente bem sucedida, na medida em que descreve com grande precisão praticamente todos os experimentos já realizados para testá-la. Recentemente, a descoberta (a ser ainda confirmada definitivamente) de um dos últimos blocos de construção do modelo padrão, o chamado bóson de Higgs, representou o coroamento desse projeto, que dominou a física de partículas no último século. A fronteira da pesquisa nessa área é dominada pela esperança de se chegar a uma descrição ainda mais básica, mais fundamental, na qual todas as partículas são diferentes manifestações das chamadas

supercordas. Essa teoria é ainda bastante controversa e está longe de alcançar o sucesso do modelo padrão, se é que um dia ainda o fará. No entanto, não se pode negar o grande avanço do conhecimento representado pela visão reducionista da ciência.

Por outro lado, uma outra escola preconiza que, mesmo que conheçamos todas as partículas mais básicas que compõem o universo e suas leis dinâmicas, esse conhecimento pouco ou quase nada nos ajuda no entendimento do comportamento de um conjunto grande desses objetos. Em princípio, por exemplo, o modelo padrão contém todas as informações necessárias para determinar a massa do próton ou do nêutron. Entretanto, estamos longe de conseguirmos realizar esse cálculo de maneira precisa. Estamos mais longe ainda de determinarmos, por exemplo, outras propriedades emergentes da física nuclear, como a energia de formação de núcleos atômicos mais pesados, formados por muitos nêutrons e muitos prótons. Talvez isso nunca se torne possível, pois esse tipo de cálculo pode requerer um poder computacional impossível de ser implementado no universo conhecido. Isso não quer dizer que o modelo padrão esteja errado ou mesmo que seja inútil. O que a escola das “propriedades emergentes” advoga é que em cada escala de energia, novos conceitos precisam ser descobertos se quisermos descrever as propriedades da natureza. A física nuclear não pode ser derivada do modelo padrão, ela é regida por suas próprias leis e estruturas. As propriedades dos sólidos, líquidos e gases, dos magnetos, dos supercondutores, dos superfluidos e dos cristais líquidos, em toda sua diversidade, também requerem novas ideias e novos conceitos, tão “fundamentais” quanto as partículas do modelo padrão. A química não “está contida” na física, pelo menos não no sentido de que podemos obter as leis da química a partir das leis fundamentais da física. Da mesma forma, a biologia não “está contida”

na química e assim por diante. A cada mudança de escala, novos conhecimentos profundos são necessários para que possamos compreender as diversas manifestações da natureza.

É importante enfatizar que ninguém duvida de que o modelo padrão descreva, provavelmente exatamente, as interações das partículas elementares, ou de que, em princípio, se possam derivar a partir dele os fenômenos da física nuclear, atômica ou da matéria condensada (sólidos e líquidos). A expressão crucial aqui é “em princípio”. Apenas um supercomputador, talvez impossível de ser construído, seria capaz de fazer essa ligação entre as várias escalas. Nossa crença nessa possibilidade “em princípio”, no entanto, repousa na limitada capacidade que temos de fazer algumas ligações simples e aproximadas entre os fenômenos nas diferentes escalas. Há tentativas razoavelmente bem sucedidas de um cálculo aproximado das massas do próton e do nêutron a partir de primeiros princípios (7). Semelhantemente, podemos calcular de maneira ainda bastante primitiva as propriedades de algumas reações químicas muito simples a partir das interações básicas entre os elétrons. Geralmente, esses passos tímidos já consomem muitas horas de computação e qualquer coisa um pouco mais complexa está fora de cogitação. Eles,

**NÃO SE PODE
NEGAR O GRANDE
AVANÇO DO
CONHECIMENTO
REPRESENTADO
PELA VISÃO
REDUCIONISTA
DA CIÊNCIA**

no entanto, nos dão o conforto de saber que a ligação pode ser feita. Pelo menos, “em princípio”.

A visão da ciência que advoga a importância das “propriedades emergentes”, em outras palavras, assume que o todo é muito mais do que a soma de suas partes. O artigo que talvez tenha fundado essa escola, do físico Philip W. Anderson, resumiu e consagrou essa visão no seu título: “Mais é diferente” (8). Não é que o todo não seja equivalente às suas partes (e as interações entre elas). Mas o todo apresenta surpresas no seu comportamento que não podem ser encontradas no exame separado de uma ou poucas de suas partes. Um aglomerado de poucos átomos de nióbio não nos parece ter nada de excepcional. Junte, no entanto, um número grande deles formando um cristal, abaixe sua temperatura e ele será um supercondutor!

Muito ainda está por se construir. Estamos longe de entendermos, ou mesmo conhecermos, todas as formas de quebra espontânea de simetria e suas propriedades emergentes. Em 1986, foram descobertos compostos que se tornam supercondutores a temperaturas bem mais altas que aqueles conhecidos anteriormente. Essas temperaturas ainda estão bem abaixo da temperatura ambiente (as mais altas são em torno de -140°C), mas já representaram um enorme salto e a esperança de se descobrirem supercondutores à temperatura ambiente continua. Desde 1986, várias classes diferentes de compostos supercondutores de “alta temperatura” foram descobertos e a procura prossegue vigorosamente. Ainda não se sabe o que explica esse comportamento e acredita-se que esses novos supercondutores sejam essencialmente diferentes dos antigos. As teorias mais recentes invocam algum tipo ainda não elucidado de quebra espontânea de simetria. Só o tempo trará a resposta definitiva. Vários outros compostos, nem sempre com comportamento tão surpreendente, mas nem por isso menos interessantes, são estudados todos os dias. Acredita-se que o próprio universo, à medida que se resfriou desde o “big bang” até as temperaturas de hoje, passou por algumas transições de fase antes do seu estágio atual. Os prótons e nêutrons, que hoje sabemos serem formados de quarks, não existiam na sopa primordial. Nela, as partículas formadoras dos prótons e nêutrons, os quarks e seus parceiros, os glúons, eram livres para existir como partículas individuais. Isso não é mais possível na atual densidade do universo, mas experimentos em aceleradores atuais, que colidem núcleos atômicos pesados como os do ouro a altíssimas energias, são capazes de criar, por períodos curtíssimos de tempo, esse chamado plasma de quarks e glúons (9). No outro lado do espectro de energia, alguns tipos de átomos são resfriados a temperaturas baixíssimas (da ordem de um milésimo de bilionésimo de grau acima do zero absoluto) e aprisionados em armadilhas magnéticas e/ou ópticas. Nessas condições, algumas das propriedades de líquidos e sólidos macroscópicos, como superfluidez e magnetismo, podem ser criadas e estudadas (10).

O conceito de quebra espontânea de simetria, que perpassa os vários ramos da física, serve como ferramenta de fertilização cruzada do conhecimento. Pode-se estudá-lo num extremo do espectro e obter percepções importantes para o outro. A física atômica ajuda a física da matéria condensada. A física de partículas fertiliza a física nuclear. A teoria das supercordas influencia a produção de

conhecimento na pesquisa dos supercondutores de alta temperatura. O que parece certo é que a visão reducionista, apesar de imprescindível e extremamente bem sucedida, não é suficiente para abarcar todo o empreendimento da busca científica. A cada passo, propriedades emergentes e novas quebras espontâneas de simetria irão nos surpreender.’

Eduardo Miranda é físico, professor titular do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. É claro que nunca conseguimos posicioná-la exatamente no centro e nem o fundo da garrafa é perfeitamente simétrico. Esses desvios da situação ideal determinam, na prática, a direção “escolhida” pela bolinha.
2. A distinção entre o que é uma quantidade “macroscópica” ou “microscópica” é arbitrária, mas podemos utilizar como definição útil de “macroscópico” um número da ordem um mol (aproximadamente 10^{23}) de moléculas.
3. Pennisi, E. “Diverse crystals account for beetle sheen”. *Science*, v. 341, n. 6142, p. 120. 2013.
4. É importante notar que a oscilação do nitrogênio na amônia não é causada por agitação térmica como nos exemplos anteriores. Nesse caso, são as leis da mecânica quântica que causam a instabilidade da estrutura de simetria quebrada.
5. Castellani, E. “Reductionism, emergence, and effective field theories”. *Studies in history and philosophy of science part B: studies in history and philosophy of modern physics*, v. 33, nº 2, p. 251-267. 2002.
6. Batterman, R. W. “Emergence, singularities, and symmetry breaking”. *Foundations of Physics*, v. 41, nº 6, p. 1031-1050. 2011.
7. Kronfeld, A. S. “The weight of the world is quantum chromodynamics”. *Science*, v. 322, nº 5905, p. 1198-1199. 2008.
8. Anderson, P. W. “More is different”. *Science*, v. 177, nº 4047, p. 393-396. 1972.
9. Braun-Munzinger P.; Stachel, J. “The quest for the quark-gluon plasma”, *Nature*, v. 448, pp. 302-309. 2007.
10. Bloch, I.; Zoller, P. “Ultracold atoms and molecules in optical lattices”, In: Levin, K.; Fetter, A. L.; Stamper-Kurn, D. M. (Eds.). *Ultracold bosonic and fermionic gases*. Elsevier, v. 5, cap. 5, p. 121-156. 2012.