ESPECULADO EXAURIMENTO DO PARADIGMA MECANICISTA

Para mim, a maior das descobertas ainda por vir será saber como este universo, nascido de um Big Bang, desenvolveu suas leis de operação. Chamo isso "Lei sem Lei"

John A Wheeler

Alaor Chaves

Este breve ensaio não é um artigo científico, embora ele mencione questões fundamentais da física. O leitor deve vê-lo como uma consideração filosófica sobre o caráter das leis físicas. Galileu descobriu que a cinemática das partículas pode ser descrita por leis matemáticas e concluiu que o livro da natureza era escrito em linguagem matemática. Descartes, o expoente do mecanicismo, escola filosófica que veio pouco depois, fortaleceu essa convicção e propôs que o universo fosse um mecanismo de infinita precisão cujo movimento era regido por determinismo causal. Coube a Newton formalizar uma teoria completa para o universo mecânico. O determinismo causal foi incorporado à teoria newtoniana por meio de uma equação diferencial no espaço e no tempo que regeria o movimento dos corpos. O mecanicismo de newton acabou se transformando em um metaparadigma que perdura até hoje, pois todas as teorias posteriores da físicas fundamental incorporaram o seu princípio de que as leis fundamentais da dinâmica são equações diferenciais deterministas no espaço e no tempo. Esse projeto teve um sucesso extraordinário e tornou-se cada vez mais matematizado. Mas suas limitações também são evidentes, e dentre elas aparecem contradições. Neste cenário, muitos físicos teóricos brilhantes digladiam com equações matemáticas de enorme sofisticação na busca de uma teoria mais abrangente que incorpore tudo já conhecido em física fundamental. Quase invariavelmente, eles permanecem mecanicistas, até mesmo porque uma filosofia é mais resiliente do que uma ciência. Minha intenção é essencialmente provocativa. Especulo que os elementos fundamentais que compõem o universo estejam numa escala de tamanho muito abaixo da que somos capazes de acessar experimentalmente, que seu comportamento seja caótico, e que desse caos reinante na escala ultramicroscópica emerjam as leis da física por nós conhecidas.

Um mecanismo de infinita precisão

René Descartes (1596 -1650) foi o expoente filosófico do mecanicismo, escola de pensamento que perdura até hoje. Segundo ele, o universo é um mecanismo de infinita precisão que pode ser descrito *more geometrico* (ao modo da geometria). Em parte, inspirou-se em Galileu (1564 -1642), segundo quem as leis da natureza são escritas em linguagem matemática. Mas há uma divergência essencial entre Galileu e Descartes. Galileu – assim como seu contemporâneo Francis Bacon (1561-1626) – defendia o empirismo, o método científico baseado na experimentação. Descartes, o criador do racionalismo moderno, atribuiu aos experimentos um papel menor. Em alguns casos, duas teorias puramente

dedutivas tinham igual mérito matemático e a decisão entre elas tinha de ser feita por algum experimento para os quais elas previssem resultados distintos. Baruch Spinoza (1632-1677) foi um seguidor de Descartes que levou seu racionalismo ao extremo, principalmente no seu livro *Renati des Cartes Principiorum Philosophiae Pars I & II, More Geometrico Demonstratae.*

Segundo Descartes, o mecanismo do mundo se moveria por determinismo causal, no qual o estado presente da matéria ditaria a sua evolução no infinitésimo temporal seguinte. Isaac Newton (1643-1727), no célebre livro Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (1687), concretizou o projeto cartesiano de formular em termos matemáticos uma teoria completa do mundo mecânico. Para incorporar na teoria o determinismo causal, Newton expressou a lei da dinâmica da mecânica na forma de uma equação diferencial no espaço e no tempo.

A beleza matemática da teoria newtoniana exibiu-se de forma magnífica quando, em 1788, Joseph-Louis Lagrange (1736 -1788) demonstrou que a lei de movimento de Newton pode ser deduzida a partir do chamado princípio da ação. Quase todo físico recorda-se da emoção que sentiu ao tomar contato com a formulação lagrangeana da mecânica newtoniana.

No século19, desenvolveu-se o eletromagnetismo, referente a fenômenos não mecânicos, e em 1865 James Clerk Maxwell (1831-1879) sintetizou esse novo ramo da física em uma teoria abrangente, também descrita matematicamente na forma de equações diferenciais que reproduzem o determinismo causal de Descartes e Newton. Maxwell demonstrou ainda que a luz é um fenômeno de natureza eletromagnética.

No século 20, a mecânica newtoniana foi estendida, com base em importantes inovações conceituais. A primeira extensão, a teoria da relatividade restrita, formulada por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, possibilitou descrever movimentos a velocidades próximas à da luz. A segunda, a teoria da relatividade geral, também formulada por Einstein em 1915, possibilitou descrever o movimento sob o efeito de atrações gravitacionais que só podem ser vencidas se a velocidade relativa dos corpos interagentes é significativa em relação à velocidade da luz. Segundo a relatividade geral, a gravitação é um fenômeno geométrico – resulta da deformação do espaço-tempo pelas massas.

Nos anos 1920, um grupo de físicos formulou a mecânica quântica – que descreve a dinâmica de sistemas nas escalas atômica e subatômica – com base em ideias de Max Planck (1858-1947) e Einstein, e um conjunto de dados experimentais. Também a mecânica quântica é descrita em termos de uma equação diferencial em que o chamado estado quântico de um sistema evolui de maneira determinista. Mas esse estado quântico não prevê o que será observado em um experimento específico, por exemplo, sobre o decaimento radioativo de um átomo ou o movimento de um elétron. O estado quântico só exprime probabilidades sobre os eventos em pequena escala e padece ainda de uma

sensibilidade incômoda: ao averiguá-lo por meio de um experimento, geralmente o alteramos, e sequer somos capazes de saber se ele foi ou não alterado. A mecânica quântica gerou muita polêmica, até mesmo entre seus formuladores. Einstein foi o mais ilustre físico a não a aceitar como uma teoria completa. Na sua visão, haveria variáveis não reveladas na sua formulação (variáveis escondidas), que quando descobertas reabilitariam o determinismo negado em sua formulação provisória. Houve calorosos debates, principalmente entre Einstein e Niels Bohr (1885-1962), um dos criadores da MQ e defensor habilíssimo da sua interpretação probabilística. O fato de que uma partícula subatômica pudesse se comportar como onda ou como partícula, dependendo do experimento usado para observá-la, tecnicamente denominado dualidade onda-partícula, perturbava a todos. Em 1952, Niels Bohr disse: “Aqueles que não se chocaram quando pela primeira vez se defrontaram com a teoria quântica provavelmente não a entenderam”. Em 1962, Richard Feynman (1918-1989), autor da mais poderosa formulação da MQ – a lagrangeana –, disse diante de um auditório assustado: “Penso poder dizer seguramente que ninguém compreende a mecânica quântica”. Em entrevista em 1986, John S. Bell (1928-1990), autor do célebre teorema (1964), segundo o qual nenhuma teoria com variáveis escondidas locais pode explicar todos os fenômenos quânticos, afirmou: “Estou bastante convencido de a teoria quântica é apenas um expediente temporário. ”

Distintamente da teoria eletromagnética e da teoria da relatividade, que podem ser deduzidas de princípios gerais – no caso da relatividade, de princípios de simetria –, a mecânica quântica é uma construção *ad hoc* que não se apoia em qualquer princípio. Entretanto, ela tem um poder preditivo descomunal e, muitos afirmam, está em concordância com todos os fatos observados. Isso é falso, como veremos mais adiante. Tanto quanto a MQ, a relatividade geral e o eletromagnetismo podem ser deduzidos matematicamente a partir do método lagrangeano.

Modelo padrão de partículas

Com base na mecânica quântica e em princípios de simetria, construiu-se o chamado modelo padrão de partículas (MP). Com ele, foi possível descrever três das quatro forças da natureza (a eletromagnética, e as forças nucleares fraca e forte) por peio das chamadas teorias de calibre, cuja base são simetrias abstratas Foi ainda possível unificar as forças eletromagnética e fraca na chamada teoria eletrofraca, classificar as partículas elementares e explicar como duas centenas de partículas chamadas hádrons – que incluem o próton e o nêutron – são formadas pela combinação de quarks, que são partículas elementares com carga fracionária. O modelo também previu a existência de algumas partículas, como o bóson de Higgs (observado meio século depois) e três outros bósons, o W^+, o W^- e o Z, observados no final dos anos 1970. Muitas propriedades dos hádrons também foram previstas com boa precisão pelo MP.

O sucesso do MP é realmente notável, mas sabe-se que ele não é uma teoria completa. O modelo contém cerca de vinte grandezas cujos valores não podem ser calculados, e por isso precisam ser determinados experimentalmente. Ele parece ser incapaz de explicar a assimetria entre matéria e antimatéria, essencial para que nosso universo, criado no big bang, tenha perdurado até hoje. Para completar a lista de deficiências, com base no modelo padrão não se pode explicar a matéria escura, que mantém coesas as galáxias e seus aglomerados, nem a energia escura que acelera a expansão do universo. Juntas, matéria escura e energia escura respondem por 96% da massa do universo; ou seja, o MP só explica 4% do universo observável.

Inconsistências e infinitos

Como dito, o MP descreve três das quatro forças da natureza. Mas deixa de fora a força da gravitação, a única que atua sobre todas as partículas. A dificuldade parece não residir nas chamadas teorias de calibre, fundamento do MP, mas em algo ainda mais fundamental: a MQ parece ser incompatível com a gravitação descrita pela teoria da relatividade geral. É hoje consensual que as duas teorias não podem ser ambas inteiramente verdadeiras. Isso é realmente dramático: a relatividade e a MQ são os dois pilares da física contemporânea, mas não são compatíveis entre si. Tanto a mecânica quântica quanto a gravitação einsteiniana, quanto estendidas a escalas infinitesimais, levam a valores infinitos para um grande número de grandezas físicas. A massa, e também a carga elétrica de partículas elementares como o elétron, é infinita, e assim por diante. Por meio de uma construção matemática chamada renormalização (1947-1948), tornou-se possível calcular valores finitos – e concordantes com os experimentos – para as grandezas que medimos. Os construtores da renormalização acreditavam que ela era um expediente provisório, mas ela ainda permanece em prática e assimilada com muito gosto pelas gerações seguintes – paramos de pensar sobre um problema científico por duas razões: ele é resolvido ou os cientistas desistem de resolvê-lo.

Há outro infinito perturbador decorrente da MQ. Um campo, por exemplo, o campo elétrico, tem um valor em cada ponto do espaço. Em cada ponto, esse campo sofre flutuações intrínsecas, além de apresentar um valor mínimo. Se supusermos que o espaço é infinitamente divisível, esse valor mínimo levará matematicamente a uma densidade infinita para a energia do vácuo. Mas há boas razões para se acreditar que o espaço não seja divisível abaixo de uma certa separação, chamada comprimento de Planck, cujo valor é cerca de 10^{-35} metros – 1 centésimo de bilionésimo de bilionésimo do tamanho do próton –. Levando isso em conta, a densidade calculada para a energia do vácuo não é infinita, mas seu valor permanece aterrador, 10^{120} vezes maior do que a densidade da energia escura obtida pelos dados astronômicos. Essa é de longe a maior discordância numérica entre teoria e dados empíricos existente na ciência.

Mecanicismo e irreversibilidade

Como dito, ao matematizar o mecanicismo causal, Newton expressou a lei dinâmica da mecânica por meio de uma equação diferencial no espaço e no tempo. Com isso, criou um metaparadigma que transcendeu a física newtoniana. Em todas as teorias fundamentais posteriores da física, a dinâmica dos sistemas também é descrita por equações diferenciais no espaço e no tempo. E todas essas equações dinâmicas ficam invariantes quando o sentido do tempo é invertido, ou seja, quando t é trocado por $-t$. Portanto, segundo a física fundamental, toda ela mecanicista, passado e futuro são equivalentes. Ou seja, segundo a física mecanicista todos os fenômenos são reversíveis, o que contradiz quase tudo que observamos no mundo macroscópico. O café que se resfriou nunca irá se aquecer espontaneamente, a omelete nunca volta a ser ovo e queijo, nosso nascimento sempre antecede nossa morte. Essa impossibilidade de reverter os fenômenos macroscópicos é chamada flecha do tempo, e a física fundamental é incapaz de explicá-la.

Todas as grandezas que aparecem na física mecanicista podem ser expressas em termos de três grandezas fundamentais, o comprimento, o tempo e a massa. Entretanto, no mundo macroscópico aparece uma grandeza, a temperatura T, associada à nossa percepção de quente e frio, a qual não pode ser expressa em termos das três grandezas fundamentais do mecanicismo. Conjugada à temperatura, existe no mundo macroscópico uma outra grandeza, a entropia S, que também não pode ser expressa em termos das grandezas mecanicistas. A entropia mede o grau de desordem de um sistema macroscópico e é a grandeza com base na qual se formula a segunda lei da termodinâmica (SLT), segundo a qual a entropia de um sistema fechado – sem influência do ambiente – nunca decresce. A entropia do sistema aumenta até que ele atinja um estado de equilíbrio termodinâmico, no qual ela permanece constante. Segundo Einstein, a SLT é a única lei da física que nunca será alterada. Se isso for verdade, a chamada física fundamental tem de, como uma das suas metas essenciais, contê-la como uma das suas predições. Não há o menor indício de que o mecanicismo possa atingir tal feito. Pelo contrário, ele parece irremissivelmente contrário à SLT. Com base na mecânica quântica, é possível demostrar matematicamente, em duas linhas, que a entropia de um sistema fechado permanece constante. É importante considerar que no universo não há nenhum sistema inteiramente fechado. Podemos por isso ficar tentados a tentar justificar o crescimento da entropia dos sistemas quase fechados como decorrente da pequena influência do seu ambiente sobre ele. Tal justificativa é repetida com frequência, mas não funciona. Consideremos, por exemplo, uma estrela como o nosso Sol. Ela se forma por condensação de gases rarefeitos por atração gravitacional mútua. Aquece-se até dar início ao processo de fusão nuclear do hidrogênio e do hélio, o que gera ainda mais calor, o qual gera enorme radiação de luz com espectro térmico, o de maior entropia. Todo o processo descrito é essencialmente insensível à interação da estrela com o resto da galáxia, com a radiação de fundo que permeia o espaço ou qualquer outra coisa que nos ocorra.

Lei zero da termodinâmica

A grandeza temperatura é essencial para que entenda a chamada lei zero da termodinâmica, descrita a seguir. Se dois sistemas, A e B, são postos em contato, calor irá fluir do corpo mais quente para o mais frio, até que os dois atinjam o estado de equilíbrio térmico. É fato empírico que, se o sistema A está em equilíbrio térmico com o sistema B e este está em equilíbrio térmico ou um terceiro sistema C, A está também em equilíbrio térmico com C. Essa propriedade de transitividade não decorre da lógica. Por exemplo, dois sistemas que estejam em equilíbrio químico com um terceiro não estão necessariamente em equilíbrio entre si. É impossível deduzir a lei zero com base em princípios mecanicistas. A lei zero implica que dois sistemas em equilíbrio térmico compartilham uma dada grandeza, a temperatura.

Parte do fracasso das tentativas de explicar mecanicamente a lei zero decorre de um equívoco usado como ponto de partida para o empreendimento. O equívoco é supor que temperatura mede a energia média associada a cada grau de liberdade do sistema ou – no caso de sistemas fora do equilíbrio térmico interno –, de uma dada região dele, hipótese denominada equipartição de energia. Isso é falso. Quando um corpo sólido está em equilíbrio térmico com um fluido, a energia associada aos graus de liberdade do fluido é maior, às vezes muito maior. Também não há equipartição de energia no interior de um corpo sólido não homogêneo em equilíbrio térmico interno.

A beleza como critério de seleção de teorias

A crença em leis naturais de infinita precisão é uma forma de teísmo. Einstein era um teísta assumido. Um cartesiano no sentido radical de Spinoza, Einstein via o universo como um mecanismo que podia ser desvendado pela razão – embora ele visse essa inteligibilidade do universo como seu maior mistério. Essa ordem – matemática e altamente estética – que deu origem às leis naturais seria oriunda de uma entidade que na, visão de Einstein, não tem caráter antropomórfico. Einstein também via o universo como uma estrutura que seria inteligível a partir de uma teoria unificada. Não surpreende que a beleza fosse seu principal critério na formulação de uma teoria unificada que ele perseguiu durante décadas. Seu programa permanece vívido e é a inspiração da quase totalidade dos cientistas que trabalham na ‘física fundamental’.

Em 1960, o físico matemático Eugene Wigner (1902-1996), prêmio Nobel de física de 1964, publicou um artigo com o título *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences* (A Não Razoável Efetividade da Matemática nas Ciências Naturais), que tem sido discutido desde então. Para que essa efetividade faça sentido, parece necessário supor que o universo seja isomorfo a uma estrutura matemática que tenha realidade objetiva no sentido platônico. Em 2014, o cosmólogo Max Tegmark publicou o livro *Our Mathematical Universe: my quest for the ultimate nature of realiy* (Nosso Universo Matemático: minha busca pela natureza última da realidade), que atraiu muita atenção e foi objeto de louvores. Tegmark vai mais longe do que pedia

Wigner e defende que a realidade física seja uma estrutura matemática. Como em princípio há uma quantidade ilimitada de estruturas matemáticas autoconsistentes, deve haver também uma infinidade de universos. Tegmark justifica assim a ideia do multiverso, que não pode ser testada empiricamente.

Teoria de tudo

Como vimos, apesar do notável sucesso preditivo e prático da física mecanicista, ela é praguejada por inconsistências e pela incapacidade de explicar a flecha do tempo. Mas o cientista é por natureza um otimista, e muitos grandes físicos sonham com uma teoria de tudo (TOE, é a sigla em Inglês), fundada em uma única, ou algumas leis gerais, em princípio capaz(es) de explicar todos os fenômenos. Sequer questionam o caráter dessa teoria final, ela é sem dúvida mecanicista. Sua beleza seria tão extraordinária, que ao contemplá-la todos os físicos e filósofos aceitariam a sua veracidade, mesmo antes de submetê-la a testes empíricos. Esse triunfalismo precoce aparece em muitos livros para o grande público, alguns deles de extraordinário sucesso editorial.

Na busca, ou sonho, da TOE, os físicos são criativos e ousados ao propor teorias mais gerais, das quais o MP seria uma aproximação válida em baixas energias. Uma ideia que aparece em quase todas as novas propostas é a da supersimetria, segundo a qual para cada férmion – partículas que não podem ocupar o mesmo estado quântico – haveria um bóson – partículas não sujeitas à mencionada lei de exclusão – e vice-versa. Uma vez que nenhum parceiro supersimétrico das partículas existentes jamais foi observado, a supersimetria seria uma simetria quebrada e com isso os parceiros supersimétricos das partículas conhecidas teriam massas muito maiores. Há esperanças de que, com o aumento recente da energia do grande colisor de hádrons (LHC para a sigla em Inglês), algum parceiro supersimétrico seja descoberto.

Not even wrong

A Wolfgang Pauli (1900-1958) famoso pela franqueza, um jovem colega pediu a opinião sobre um trabalho seu e ouviu a resposta: *it is not even wrong* – (não é nem mesmo errado). Não se sabe ao certo o que Pauli quis dizer, mas *not even wrong* passou a ser usado para qualificar teorias que não fazem nenhuma predição nova e por isso não podem ser falseadas. *Not Even Wrong: the failure of string theory and the search for unity in physical law* (Nem Mesmo Errado: o fracasso da teoria de cordas e a busca por unidade nas leis físicas) é o título de um livro de Peter Woit (2006) sobre a intrigante e resiliente popularidade das teorias de cordas (TC) e teorias de supercordas (suas versões supersimétricas). Tais teorias, que monopolizam já por décadas o interesse de muitos talentosos físicos teóricos e de vários matemáticos, levaram a importantes avanços na matemática, mas até hoje não fizeram uma única predição falseável. No mesmo ano de 2006, Lee Smolin publicou o livro *The Trouble with Physics* (Os Problemas com a Física), com críticas bem semelhantes às de Woit sobre as teorias de cordas. Nestas teorias as partículas elementares, que no MP são

entidades pontuais, são vistas como modos normais de minúsculas cordas (ou membranas) vibrantes. O espaço tridimensional que conhecemos é substituído por um espaço com três dimensões estendidas, mais seis ou sete dimensões que se compactam numa escala próxima à de Planck. Tanto Woit quanto Smolin consideram as TC não propriamente teorias, mas sonhos sobre uma teoria que jamais foi concretamente formulada, e apontam o fato como algo inédito na história da ciência. Na opinião de ambos, estamos diante de um fenômeno em grande parte sociológico no qual um grupo de físicos especialmente famosos monopolizou o 'mercado' de ideias de como unir gravitação e MQ numa teoria mais geral, poderosa o suficiente para resolver os problemas que praguejam a física fundamental. Woit critica esse monopólio de maneira especialmente dura no Cap. 16 – *The Only Game in Town* – do seu livro.

Segundo Smolin, que iniciou a carreira de físico trabalhando em TC e tem grande conhecimento não só de física, mas também do funcionamento das grandes universidades americanas e europeias, o assédio aos jovens físicos pela comunidade de cordas é tão forte que muitos deles aderem ao time, mesmo sem acreditar em TC, pois qualquer outra opção seria suicídio profissional: nas grandes universidades americanas, é quase impossível obter *tenure* (estabilidade) por trabalhos em física fundamental sem ligação com TC!

Muito recentemente (12 de junho/2018), Sabine Hossenfelder, pesquisadora em gravitação quântica publicou o livro *Lost in Math: how beauty leads physics astray* (Perdida na Matemática: como beleza tira a física do caminho), do qual só li os fragmentos franqueados pela Amazon, e sobre o qual li quatro resenhas. Em uma entrevista, Hossenfelder afirma estar consciente de que ao escrever o livro estava dando adeus às chances de obter *tenure*. Sua principal crítica é a eleição da beleza matemática das formulações como critério de seleção de teorias científicas. Realmente, o bordão 'é bonita demais para não ser verdadeira', cantado em defesa de TC, não soa nada científico.

A inacessível escala de Planck

Há uma relação entre tamanho e energia. No caso de ondas eletromagnéticas, quanto menor o comprimento da onda, maior a sua frequência – um é inversamente proporcional ao outro –, e segundo a MQ as partículas de luz (fótons) têm energia proporcional à sua frequência associada. No caso de partículas com massas, como o elétron e o próton, a proporcionalidade inversa entre comprimento de onda e energia é válida para partículas com altas energias. Na exploração da natureza por meio de colisões de partículas, quanto menor a dimensão a ser explorada, maior a energia requerida das partículas. A menor escala de tamanho acessível pela energia do LHC, o maior acelerador de partículas existente, é 10^{-19} m (décimo de bilionésimo de bilionésimo de metro). Não há nenhum teste experimental de leis físicas abaixo dessa escala. Há um enorme hiato entre essa escala e a escala de Planck. Aparentemente, nenhum físico acredita que se possa alcançar experimentalmente a escala de Planck. Para atingi-la, um acelerador que empregasse o tipo de tecnologia do LHC, ou

qualquer outra atualmente imaginável, teria de ter o tamanho da Via Láctea. Assim, o que se espera de uma TOE é inteira autoconsistência matemática, unificação das forças da natureza e concordância com todos os fatos empíricos conhecidos. A conciliação entre mecânica quântica e gravitação também é essencial. Os fatos empíricos conhecidos seriam aproximações da TOE nos limites de baixa energia da teoria final e unificada.

Seria o mecanicismo um paradigma exaurido?

A nossa ignorância sobre a escala ultramicroscópica é total, e provavelmente insuperável. Até mesmo a inatingível escala de Planck é uma construção matemática baseada nos valores das três constantes universais conhecidas, a constante de Planck *h*, a velocidade da luz *c* e a constante gravitacional *G*. Talvez os elementos fundamentais do tecido do cosmos estejam na escala de Planck, mas mão se pode descartar a hipótese de que eles estejam em alguma escala ainda menor. Em falta de outro, usarei o termo mônada, de Leibniz, para descrever esses elementos últimos. Fico só com o termo, não com os atributos associados por Leibniz a essas entidades. Evitando o mecanicismo, podemos supor que nenhuma lei determine o comportamento das mônadas. Entretanto, qualquer coisa acessível por experimentos teria tamanho número de mônadas que do comportamento caótico dessas poderiam emergir leis que simulariam leis fundamentais. Teríamos assim as 'leis sem leis' de Wheeler.

As leis emergentes resultam da matemática dos grandes números. Nesse caso, em vez de dizer que as leis naturais são descritas em linguagem matemática, poderíamos dizer que, a partir do caos reinante a nível das mônadas, a matemática gera leis aparentemente fundamentais nas escalas acessíveis ao ser humano.

No cálculo das probabilidades oriundas de fenômenos aleatórios, a principal ferramenta matemática é a análise combinatória. Com esta, podemos calcular, por exemplo, de quantas maneiras podemos arranjar *N* moedas de modo a termos *n* caras e *N* – *n* coroas. A operação mais comum na análise combinatória é o cálculo do fatorial de um número inteiro. O fatorial do número *n* é

$$n! = n(n-1)(n-2)\ldots 2\,.$$

O fatorial de um número é obviamente um número inteiro. Entretanto, para *n*! grande vale a fórmula de Stirling

$$n! \cong \sqrt{2\pi n}\left(\frac{n}{e}\right)^n.$$

A fórmula é uma igualdade aproximada, e quanto maior for *n*! Mais precisamente ela se aplica. Para n = 1000, um número não muito grande, *n*! já é um número com 2568 dígitos e a aproximação de Stirling já é muito boa. Para números muito

grandes, a diferença entre números inteiros e fracionários torna-se irrelevante na prática. Vemos que a análise combinatória de números grandes gera dois números de enorme importância na física: o número π = 3,14159..., a razão entre o perímetro de um círculo e seu diâmetro e o número de Euler e = 2,71828.... Esses são os números que aparecem com maior frequência tanto na matemática quanto na física. Repito a pergunta feita em outros termos por Wigner: o que o perímetro do círculo tem a ver com jogo de moedas? E o número de Euler, o que tem a ver com o jogo? Além desses dois números, há um terceiro número de enorme importância para a matemática e a física: o número imaginário *i,* que por definição é a raiz quadrada de –1. O número *i* aparece na equação dinâmica da mecânica quântica, qualquer que seja a sua versão. Acontece que os três números π, *e* e *i* não são independentes, pois

$$e^{i\pi} = -1.$$

Concluímos assim que os três números mais importantes da matemática e da física têm relação misteriosa – apesar de demonstrada – com o jogo de moedas, o emblema da aleatoriedade. Indivíduos propensos a divagações, como confesso ser, podem ficar tentados a imaginar que as leis sem leis, que governam o universo especulado por Wheeler, sejam emergentes do comportamento caótico dos seus elementos. O que teria o perímetro do círculo a ver com isso? Pelo jeito, a própria geometria do espaço pode resultar desse caos.

Há ainda um fato sugestivo de que as leis naturais sejam emergentes do comportamento caótico dos verdadeiros elementos do universo. A simetria é surpreendentemente ubíqua na natureza e nas leis que a regem. Tão ubíqua que na busca de novas teorias matemáticas sobre a natureza, virou hábito universal os físicos tentarem postular princípios de simetria com base nos quais essas teorias pudessem ser deduzidas. Vejo aqui uma coincidência intrigante: a dinâmica de elementos que se comportam aleatoriamente também leva a estados simétricos. Se injetarmos gás em uma caixa, suas moléculas irão se difundir, cada uma seguindo um movimento caótico, até que a densidade de moléculas na caixa fique homogênea. Este é exatamente o estado mais simétrico para a distribuição das moléculas na caixa. Se atirarmos à sorte um grande número de moedas, no final teremos igual número para caras e coroas, novamente o estado mais simétrico. A conclusão é que da dinâmica caótica de um número grande de elementos é matematicamente provável que surjam leis emergentes de alta simetria.